

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KARINA GUEDES CUBAS DO AMARAL

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE NO GERENCIAMENTO DO LODO E
BIOGÁS, EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS, UTILIZANDO A
TÉCNICA DE ACV

CURITIBA

2018

KARINA GUEDES CUBAS DO AMARAL

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE NO GERENCIAMENTO DO LODO E
BIOGÁS, EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS, UTILIZANDO A
TÉCNICA DE ACV

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em
em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental,
Setor de Tecnologia, Universidade Federal do
Paraná, como requisito parcial à obtenção do título
de Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e
Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Mansur Aisse

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Rafael Collere
Possetti

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

AM485a

Amaral, Karina Guedes Cubas do

Avaliação da sustentabilidade no gerenciamento do lodo e biogás, em estação de tratamento de esgotos, utilizando a técnica de ACV / Karina Guedes Cubas do Amaral. – Curitiba, 2018.
168 p. : il. color. ; 30 cm.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2018.

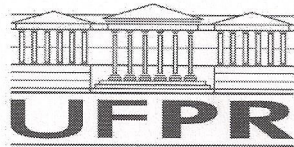
Orientador: Miguel Mansur Aisse.

Coorientador: Gustavo Rafael Collere Possetti.

1. Avaliação ambiental. 2. Avaliação econômica. 3. Avaliação social. 4. Esgoto sanitário.
5. Reatores UASB. I. Universidade Federal do Paraná. II. Aisse, Miguel Mansur. III. Possetti, Gustavo Rafael Collere. IV. Título.

CDD: 628.445

Bibliotecária: Romilda Santos - CRB-9/1214



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **KARINA GUEDES CUBAS DO AMARAL** intitulada: **AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE NO GERENCIAMENTO DO LODO E BIOGÁS, EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS, UTILIZANDO A TÉCNICA DE ACV**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 27 de Abril de 2018.

MIGUEL MANSUR AISSE
Presidente da Banca Examinadora

URIVALD PAWLOWSKY
Avaliador Interno

ADALBERTO NOYOLA ROBLES
Avaliador Interno

71 skype

SIMONE BITTENCOURT
Avaliador Externo

GUSTAVO RAFAEL COLLERE POSSETTI
Avaliador Externo

MARCELO REAL PRADO
Avaliador Externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus por sempre me iluminar nas escolhas a serem feitas e colocar pessoas certas que facilitem meu caminho aos meus objetivos.

Aos meus pais, pelo incentivo na busca do conhecimento e continuidade do aprendizado.

Ao meu marido, por sempre me apoiar nas decisões e na ajuda nesses anos de doutorado.

Aos meus filhos, pela alegria e amor que me proporcionam. São o incentivo para o crescimento profissional e pessoal.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Miguel Mansur Aisse, pelo grande aprendizado repassado. Sempre disposto a ensinar e paciente em todas as etapas que seguiram.

Ao coorientador, Prof. Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti, pelas discussões, idéias do rumo do trabalho desde o início e aprendizagem repassados.

Aos professores Marcelo Real Prado e Uriwald Pawlowski, pelas participações das 3 qualificações e excelentes contribuições.

Ao professor Adalberto Noyola, pelas excelentes contribuições e discussões na vinda para a qualificação 3.

Ao pessoal da SANEPAR, pela ajuda, seja nas medições realizadas, obtenção de dados, conversas e discussões dos resultados: Simone Bittencourt, Bárbara Ross, Fernanda Janaína Costa, Luíz Wagner, César Marin e Eduardo (ETE Padilha).

Aos amigos e colegas do PPGERHA, Júlio Rietow, Ellen Baettker, Orlando Duarte, Ricardo Morais e Luciane Prado, pelas conversas, trocas de idéias e aprendizado.

RESUMO

Reatores de manta de lodo anaeróbico de fluxo ascendente (UASB), usados no tratamento de esgoto, geram dois subprodutos que podem ser utilizados: lodo e biogás. Atualmente, no Brasil, a maior parte desse lodo resultante é descartada em aterros sanitários, enquanto o biogás é comumente conduzido para queimadores abertos de baixa eficiência. O objetivo do presente estudo foi realizar a avaliação da sustentabilidade de quatro diferentes cenários de tratamento e destinação final do lodo biológico e biogás. A avaliação dos impactos ambientais foi realizada através da avaliação do ciclo de vida, utilizando-se como método de avaliação o ReCiPe 2016. Para a avaliação social foram utilizados os indicadores da avaliação de ciclo de vida social. A avaliação econômica foi realizada através da análise dos custos do ciclo de vida. Para a avaliação global da sustentabilidade, foi utilizado o método *Dashboard of sustainability*. Com relação à dimensão ambiental, o cenário base, no qual o lodo foi higienizado usando Estabilização Alcalina Prolongada - EAP e, posteriormente, direcionado para aplicação agrícola e o biogás conduzido para queimadores abertos, teve o maior impacto nas categorias de mudanças climáticas, ecotoxicidade terrestre e toxicidade não carcinogênica humana. O cenário 1, em que o calor resultante da combustão do biogás é usado para secar o lodo, mostrou melhorias significativas em relação ao cenário base em todas as categorias de impacto avaliadas. A recuperação do calor da combustão do biogás diminuiu em 44% o impacto ambiental associado à categoria de mudanças climáticas. A combustão do lodo é outra alternativa para melhorar o gerenciamento de lodo. Embora ocorra a redução do volume de lodo para as cinzas, há impactos ambientais inerentes à formação de ozônio e acidificação terrestre. Com relação à dimensão social, as vantagens da tecnologia EAP se referem aos salários dos trabalhadores, capacidade de geração de emprego e ao aproveitamento de nutrientes presentes no lodo biológico (N e P). No cenário 2, onde é realizada a combustão do lodo, a principal vantagem se refere à parte interessada “consumidores”, pelo alto teor de nutrientes presente nas cinzas e ausência de patógenos. O cenário 3, em que as cinzas da combustão do lodo são destinadas para aterro, não obteve desempenho na categoria de consumidores devido ao não aproveitamento do produto final. Na avaliação econômica, o cenário base é o cenário com o menor custo do ciclo de vida. O alto custo dos cenários 1, 2 e 3 se deve à etapa de higienização onde o valor de aquisição do equipamento para a secagem do lodo utilizando-se o calor do biogás e do lodo representa 56%. Com relação à avaliação global da sustentabilidade, o cenário 1, onde é utilizado o calor do biogás para a secagem do lodo e esse destinado na agricultura, obteve a maior pontuação (melhor cenário) no DoS e o cenário base apresentou a menor pontuação (pior cenário).

Palavras-chave: avaliação ambiental, avaliação econômica, avaliação social, esgoto sanitário, reatores UASB.

ABSTRACT

Upflow anaerobic sludge blanket reactors (UASB), used in the treatment of sewage, generate two by-products that can be used: sludge and biogas. Currently, in Brazil, most of this resulting sludge is disposed of in landfills, while biogas is commonly burned off in low-efficiency flares. The objective of the present study was to evaluate the sustainability of four different scenarios of treatment and final destination of biological sludge and biogas. The environmental impact assessment was performed through the life cycle assessment, using the ReCiPe 2016 as the evaluation method. For the social evaluation, the social life cycle assessment indicators were used. The economic evaluation was performed through the analysis of life cycle costs. For the global assessment of sustainability, the Dashboard of sustainability method was used. Regarding the environmental dimension, the so-called baseline scenario, in which the sludge was sanitized using prolonged alkaline stabilization - PAS and later directed to agricultural application and the biogas conducted to open burners, had the greatest impact in the categories of climate change, ecotoxicity terrestrial and human non-carcinogenic toxicity. Scenario 1, where the heat resulting from the biogas combustion is used to dry the sludge, showed significant improvements in relation to the baseline scenario in all impact categories evaluated. Recovery of the heat from the combustion of biogas significantly reduces the environmental impact associated with the category of climate change in 44%. Combustion of sludge is another alternative to improve sludge management. Although there is a reduction in the volume of sludge to ash, there are environmental impacts inherent to ozone formation and terrestrial acidification. Regarding the social dimension, the advantages of PAS technology refer to the workers' salaries, the capacity to generate employment and the use of nutrients present in biological sludge (N and P). In scenario 2, where the combustion of the sludge is carried out, the main advantage refers to the interested party "consumers", because of the high nutrient content in the ash and absence of pathogens. Scenario 3, in which sludge combustion ash is destined for landfill, did not achieve performance in the category of consumers due to non-use of the final product. In the economic evaluation, the base scenario is the scenario with the lowest cost of the life cycle. The high cost of scenarios 1, 2 and 3 is due to the hygienization stage where the acquisition value of the equipment for the sludge drying using the biogas and sludge heat represents 56%. Regarding the global assessment of sustainability, scenario 1, where the biogas heat is used for sludge drying and the one used in agriculture, obtained the highest score (best scenario) in the DoS and the baseline scenario presented the lowest score.

Key words: environmental assessment, economic evaluation, social assessment, sewage, UASB reactors.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - ONU	24
FIGURA 2 - LIMITES DO SISTEMA DE UMA AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE DO CICLO DE VIDA (ASCV).....	28
FIGURA 3 - ESTÁGIOS DO CICLO DE VIDA DE UM PRODUTO	29
FIGURA 4 - FASES DE UMA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA	29
FIGURA 5 - ELEMENTOS OBRIGATÓRIOS E OPCIONAIS PARA A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	32
FIGURA 6 - ETAPAS PARA A ANÁLISE DAS SUBCATEGORIAS DOS INDICADORES SOCIAIS	35
FIGURA 7 – FLUXOGRAMA TÍPICO DE UMA ETE COMPLETA	42
FIGURA 8 - SITUAÇÃO DA POPULAÇÃO RESIDENTE LIGADA À COLETA DE ESGOTOS EM DIFERENTES PAÍSES.	42
FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO NA AMÉRICA LATINA.	43
FIGURA 10 - PRINCIPAIS PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ESGOTO EMPREGADOS NO BRASIL EM TERMOS DE NÚMERO DE INSTALAÇÕES	45
FIGURA 11 - NÚMERO DE ETE`S POR TIPOLOGIA DE TRATAMENTO NO PARANÁ.....	46
FIGURA 12 - PROCESSAMENTO DO LODO DE ESGOTO EM UMA ETE ANAERÓBIA.....	50
FIGURA 13 - PROCESSAMENTO DETALHADO DO LODO DE ESGOTO EM UMA ETE	51
FIGURA 14 - ARMAZENAMENTO DO LODO EM LOCAL COBERTO PARA COMPLETA HIGIENIZAÇÃO	55
FIGURA 15 - ESTABILIZAÇÃO ALCALINA DE LODO: COMPONENTES DO SISTEMA.....	56
FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA TÉRMICO PILOTO DE SECAGEM DE LODOS MOVIDO A BIOGÁS	58
FIGURA 17 - PORCENTAGEM DO DESTINO FINAL DE LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS, 2015.	63
FIGURA 18 - APLICAÇÃO DO LODO DE ESGOTO EM ÁREA AGRÍCOLA.....	64
FIGURA 19 - TIPOS DE QUEIMADORES PARA BIOGÁS.....	66
FIGURA 20 - OPÇÕES PARA A UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS DE ETES.....	70
FIGURA 21 - ROTAS CONSIDERADAS NESTE ESTUDO COM RELAÇÃO AO TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DO LODO BIOLÓGICO E BIOGÁS	76
FIGURA 22 - ESQUEMA DE AVALIAÇÃO DAS 3 DIMENSÕES DA SUSTENTABILIDADE.	77
FIGURA 23 - IMAGEM AÉREA DA ETE ESTUDADA COM AS REPECTIVAS UNIDADES DE TRATAMENTO	78
FIGURA 24 – FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS COM AS ETAPAS CONSIDERADAS – Cenário base.....	79
FIGURA 25 – FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS COM AS ETAPAS CONSIDERADAS– Cenário 1.	85
FIGURA 26 - FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS COM AS ETAPAS CONSIDERADAS– Cenário 2	87
FIGURA 27 - FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS COM AS ETAPAS CONSIDERADAS– Cenário 3	89

FIGURA 28 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA MEDIÇÃO DE H ₂ S.	92
FIGURA 29 – IMAGEM AÉREA DA ETE ESTUDADA COM OS PONTOS DE MEDIÇÃO DE H ₂ S E NH ₃	93
FIGURA 30 – IMAGEM AÉREA DA ETE ESTUDADA COM OS PONTOS DE MEDIÇÃO DE RUÍDO AMBIENTAL.	94
FIGURA 31 - ESCALA DE CORES UTILIZADAS NO SOFTWARE DoS	99
FIGURA 32 - CONTRIBUIÇÃO DE CADA ETAPA DO TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DO LODO E BIOGÁS NAS CATEGORIAS AVALIADAS.	107
FIGURA 33 – PORCENTAGEM COMPARATIVA ENTRE O CENÁRIO BASE E OUTROS CENÁRIOS DE TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DO LODO BIOLÓGICO E BIOGÁS.	108
FIGURA 34 – IMAGEM AÉREA DA ETE ESTUDADA COM A CURVA DA CONCENTRAÇÃO DE H ₂ S - 14 hs	115
FIGURA 35 - IMAGEM AÉREA DA ETE ESTUDADA COM A CURVA DA CONCENTRAÇÃO DE H ₂ S - 19 hs	116
FIGURA 36 - IMAGEM AÉREA DA ETE ESTUDADA COM A CURVA DA CONCENTRAÇÃO DE NH ₃	118
FIGURA 37 - RESULTADO DOS INDICADORES SOCIAIS REFERENTES AOS 4 CENÁRIOS.	120
FIGURA 38 - CUSTOS PARA TRATAMENTO E DESTINO FINAL DO LODO BIOLÓGICO NOS 4 CENÁRIOS (R\$/UF).	124
FIGURA 39 - ESCALA DE CORES UTILIZADAS NO SOFTWARE DoS	125
FIGURA 40 - RESULTADOS DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA O CENÁRIO BASE*	126
FIGURA 41 - RESULTADOS DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA O CENÁRIO 1*	128
FIGURA 42 - RESULTADOS DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA O CENÁRIO 2*	129
FIGURA 43 - RESULTADOS DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA O CENÁRIO 3*	131
FIGURA 44 - ÍNDICE DE SUSTENBILIDADE (ESCALA DOS) PARA CADA CENÁRIO ESTUDADO.	132

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TRANSFORMAÇÃO DA ESCALA QUALITATIVA PARA SEMI-QUANTITATIVA PARA A AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS SOCIAIS.	36
TABELA 2 - ESTUDOS QUE REALIZARAM A AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE UTILIZANDO COMO FERRAMENTA A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	41
TABELA 3 - PARÂMETROS AGRONÔMICOS DOS LOTES DE LODO HIGIENIZADOS POR EAP, APLICADOS EM ÁREAS AGRÍCOLAS NO ESTADO DO PARANÁ, BRASIL, DE 2011 A 2013.....	47
TABELA 4 - PARÂMETROS INORGÂNICOS DOS LOTES DE LODO ANAERÓBIOS DO ESTADO DO PARANÁ NO PERÍODO DE 2011 A 2013.....	48
TABELA 5 - QUANTIDADE DE LODO A SER TRATADO EM DIFERENTES SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS.....	49
TABELA 6 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS, VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PROCESSOS DE DESAGUAMENTO DE LODOS	53
TABELA 7 - COMPOSIÇÃO VOLUMÉTRICA TÍPICA DO BIOGÁS GERADO EM REATORES UASB	65
TABELA 8 - ESTUDOS QUE UTILIZARAM A FERRAMENTA DE ACV PARA AVALIAÇÃO AMBIENTAL DOS DIFERENTES PROCESSOS DE TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO BIOLÓGICO.	72
TABELA 9 - TEOR DE SÓLIDOS SECOS E MASSA CORRESPONDENTE DO LODO BIOLÓGICO ANAERÓBIO DA ETE.....	80
TABELA 10 - DISTÂNCIA DAS FORNECEDORAS DOS PRODUTOS QUÍMICOS E ÁREA AGRÍCOLA ATÉ A ETE ESTUDADA.....	81
TABELA 11 – EMISSÃO DE GASES DA PÁ CARREGADEIRA E DA APLICAÇÃO DO LODO BIOLÓGICO	81
TABELA 12 - MODELOS UTILIZADOS PARA CÁLCULO DAS EMISSÕES RELACIONADAS À APLICAÇÃO DO LODO BIOLÓGICO NA AGRICULTURA	82
TABELA 13 - CONCENTRAÇÃO DE METAIS PESADO NO LODO TRATADO POR EAP. OS VALORES REPRESENTAM A MÉDIA DA CONCENTRAÇÃO DE 15 LOTES NO DECORRER DE 3 ANOS.	82
TABELA 14 - ELEMENTOS UTILIZADOS DO BANCO DE DADOS DO ECOINVENT V3	83
TABELA 15 – PRODUÇÃO, COMPOSIÇÃO E MASSA CORRESPONDENTE DE CADA COMPONENTE DO BIOGÁS (0,052 Nm ³)	83
TABELA 16 - RESULTADOS E DADOS OPERACIONAIS DO SISTEMA PILOTO DE SECAGEM TÉRMICA DE LODO ANAERÓBIO	86
TABELA 17 - CONCENTRAÇÃO DE METAIS PESADO NO LODO TRATADO POR SECAGEM TÉRMICA.....	86
TABELA 18 - CONCENTRAÇÃO DE METAIS PESADO NA CINZA RESULTANTE DA COMBUSTÃO DE LODO ANAERÓBIO	88
TABELA 19 - SUBCATEGORIAS E INDICADORES CONSIDERADOS PARA ELABORAÇÃO DOS INVENTÁRIOS SOCIAIS.....	91
TABELA 20 - CONVERSÃO DOS DADOS SOCIAIS QUALITATIVOS EM SEMI-QUANTITATIVOS.....	95
TABELA 21 - CUSTOS ENVOLVIDOS PARA O TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DO LODO E BIOGÁS.	96

TABELA 22 - INDICADORES CONSIDERADOS NESSE ESTUDO PARA A AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE.....	100
TABELA 23 - INVENTÁRIOS AMBIENTAIS DO CENÁRIO BASE, CENÁRIO 1, CENÁRIO 2 E CENÁRIO 3.....	101
TABELA 24 - VALORES DE CONTRIBUIÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL EM CADA ETAPA DE TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO E DO BIOGÁS PARA CADA CENÁRIO DO ESTUDO.....	104
TABELA 25 - VALORES DE RUÍDOS DO SECADOR TÉRMICO ROTATIVO	110
TABELA 26. VALORES DA MEDIÇÃO DE RUÍDOS AMBIENTAIS (dB) na ETE....	114
TABELA 27 - RESULTADO DOS INDICADORES SOCIAIS REFERENTES AOS 4 CENÁRIOS.....	121
TABELA 28 - CUSTO PARA TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO BIOLÓGICO E BIOGÁS (R\$/UF).....	123
TABELA 29 - PONTUAÇÃO DE CADA DIMENSÃO E ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE DE CADA CENÁRIO ESTUDADO	132

LISTAS DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACV-S	Avaliação do Ciclo de Vida Social
ASCV	Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
BD	Banco de dados
CH ₄	Metano
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COV	Carga Orgânica Volumétrica
Corg	Carbono orgânico
CCV	Custos do Ciclo de Vida
CO ₂	Dióxido de carbono
DoS	<i>Dashboard of Sustainability</i>
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EAP	Estabilização alcalina prolongada
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GRI	<i>Global Reporting Initiative</i>
FAD	Flotador por ar dissolvido
FBP	Filtro biológico percolador
FISPQ	Ficha de informação de segurança para produtos químicos
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IWA	<i>International Water Association</i>
LgA	Lagoa aerada
MLD	Milhões de litros por dia
N ₂ O	Óxido nitroso
Nkjeldahl	Nitrogênio Kjeldahl
Namoniacal	Nitrogênio Amoniactal
OD	Oxigênio Dissolvido
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU	Organização das Nações Unidas
ONG	Organização Não Governamental
RALF	Reator Anaeróbio de Lodo Fluidizado
SA8000	<i>Social Accountability 8000</i>
ST	Sólidos Totais
SST	Sólidos Suspensos Totais
SVT	Sólidos Voláteis Totais
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
TS	Teor de Sólidos
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UF	Unidade Funcional
UGL	Unidades de Gerenciamento de Lodo
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONTEXTO E PROBLEMA	17
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	RELEVÂNCIA.....	19
1.4	HIPÓTESE	21
1.5	OBJETIVOS	21
1.6	ESTRUTURAÇÃO DA TESE.....	22
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1.	CONCEITO DE SUSTENTABILIDADE	23
2.2	OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	24
2.3	AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE	25
2.3.1	Relatório de Sustentabilidade – GRI.....	25
2.3.2	Indicadores Ethos de Sustentabilidade.....	25
2.3.3	Accountability 1000 (AA 1000)	26
2.3.4	Social Accountability 8000 (SA 8000).....	26
2.3.5	Indicador de Sustentabilidade Empresarial da Bolsa de Valores de São Paulo – ISE BOVESPA.....	27
2.4	AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DO CICLO DE VIDA (ASCV)	27
2.4.1	Avaliação do ciclo de vida – Ambiental (ACV-A)	28
2.4.1.1.	Fases do estudo de ACV.....	29
2.4.2	Avaliação de Ciclo de Vida Social - (ACV – S)	34
2.4.3	Avaliação dos Custos no Ciclo de Vida – (CCV)	36
2.4.4	Ferramentas para a avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida.....	38
2.5	ESTUDOS QUE REALIZARAM A AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE.....	40
2.6	TECNOLOGIAS EMPREGADAS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS.....	41
2.6.1	América Latina e Caribe	43
2.6.2	Brasil.....	44
2.6.3	Paraná.....	46
2.7	CARACTERÍSTICAS, PRODUÇÃO E TRATAMENTO DO LODO BIOLÓGICO	46

2.7.1.	Características do lodo biológico	47
2.7.2	Produção do lodo biológico	48
2.7.3	Tratamento e gerenciamento do lodo biológico	49
2.7.3.1	Desaguamento e secagem	50
2.7.3.2.	Higienização	54
2.7.3.3	Tratamento térmico	59
2.7.4	Destino final	61
2.7.4.1	Aterro Sanitário/Industrial	61
2.7.4.2	Uso agrícola	61
2.8	TRATAMENTO E DESTINO FINAL DO BIOGÁS	64
2.8.1	Caracterização e produção do biogás	64
2.8.2	Tratamento do biogás	68
2.8.2.1	Remoção de sulfeto de hidrogênio	69
2.8.3	Destino final do biogás	69
2.9	ACV APLICADO PARA ESCOLHA DE TECNOLOGIA NO GERENCIAMENTO DO LODO E DO BIOGÁS	71
3.	MATERIAIS E MÉTODO	75
3.1	DELINEAMENTO DO TRABALHO	75
3.1.1	Área de estudo	77
3.2	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA – AMBIENTAL	78
3.2.1	Definição de objetivo e escopo	78
3.2.2	Elaboração dos Inventários Ambientais	78
3.2.2.1	Inventário Ambiental - Cenário base	78
3.2.2.2	Inventário Ambiental – Cenário 1	84
3.2.2.3	Inventário Ambiental – Cenário 2	87
3.2.2.4	Inventário Ambiental – Cenário 3	88
3.2.3	Avaliação dos impactos ambientais	89
3.3	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA SOCIAL	90
3.3.1	Elaboração dos inventários sociais	90
3.3.2	Avaliação dos impactos sociais	94
3.4	ANÁLISE DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA - ACCV	95
3.5	AVALIAÇÃO DAS TRÊS DIMENSÕES DA SUSTENTABILIDADE	98
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	101

4.1	AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA DA FASE OPERACIONAL DO TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO BIOLÓGICO E BIOGÁS.....	101
4.1.1	Inventários Ambientais	101
4.1.2	Avaliação dos Impactos Ambientais,	103
4.2	AVALIAÇÃO SOCIAL DA FASE OPERACIONAL DO TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO BIOLÓGICO E BIOGÁS.....	109
4.2.1	TRABALHADORES.....	109
4.2.1.1	Faixa salarial	109
4.2.1.2	Saúde e Segurança.....	109
4.2.1.4	Emissões gasosas consideradas prejudiciais aos trabalhadores (H ₂ S e NH ₃) / Emissão de odor.....	111
4.2.2	CONSUMIDORES.....	112
4.2.2.1	Qualidade do lodo tratado	112
4.2.2.1	Saúde e segurança.....	113
4.2.3	COMUNIDADE LOCAL E SOCIEDADE	113
4.2.3.1	Condições de vida segura e saudável.....	113
4.2.3.2	Contribuição para o desenvolvimento econômico	119
4.2.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE AVALIAÇÃO SOCIAL	119
4.3	ANÁLISE DO CUSTO DE CICLO DE VIDA – ACCV DA FASE OPERACIONAL DO TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO BIOLÓGICO E BIOGÁS	121
4.4	INTERPRETAÇÃO DA ASCV UTILIZANDO O PAINEL DE SUSTENTABILIDADE OU DASHBOARD OF SUSTAINABILITY (DOS) ...	125
5	CONCLUSÕES	134
5.1	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA AMBIENTAL (ACV – A)	134
5.2	AVALIAÇÃO SOCIAL	135
5.3	ANÁLISE DO CUSTO DE CICLO DE VIDA – ACCV.....	135
5.4	INTERPRETAÇÃO DA ASCV UTILIZANDO O PAINEL DE SUSTENTABILIDADE OU DASHBOARD OF SUSTAINABILITY (DoS)	136
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	137
	REFERÊNCIAS	138
	APÊNDICE 1 – ANÁLISE DE INCERTEZA	151

APÊNDICE 2 – GRÁFICO DO RESULTADO DAS MEDIÇÕES CONTÍNUAS DE H ₂ S NAS CANALETAS	153
APÊNDICE 3 – INVENTÁRIO ECONÔMICO	156
ANEXO 1 – INDICADORES SOCIAIS: REQUISITO BÁSICO E ESCALA DE NÍVEL PARA CADA SUBCATEGORIA.	164
ANEXO 2 – IMPACTO AMBIENTAL: MATRIZ PEDIGREE PARA ANÁLISE DE INCERTEZA	169

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E PROBLEMA

O crescimento da população na América Latina e Caribe (LAC) superou a capacidade dos governos nacionais e locais em atender a demanda de abastecimento de água e saneamento básico (NOYOLA et al., 2012). Os dados do Atlas Esgotos confirmam ao divulgar que a porcentagem de coleta de esgotos é de 61,4% e o tratamento de 42,6% (BRASIL, 2017). Novas estações e a ampliação da capacidade e nível de tratamento das existentes devem ser projetadas para atender a necessidade dos esgotos sanitários gerados. Como consequência desta ampliação tem-se o aumento da geração do lodo biológico e biogás. São gerados aproximadamente 30 kg de lodo seco/habitante.ano (HOSPIDO et al., 2010) e 28 NL de biogás/habitante.ano, sendo que aproximadamente 40% é perdido juntamente com efluente, em estações que utilizam reatores anaeróbios (JESUS NETTO, 1936; AZEVEDO NETTO, 1977; PRESSINOTTI; SILVA, 2015) são gerados em todo o mundo e a sua gestão econômica e ambientalmente sustentável tem sido discutida nos últimos anos (HOSPIDO et al., 2010).

Os sistemas de tratamento possuem a função de minimizar os impactos ambientais do lançamento de efluentes no meio ambiente, mas eles próprios apresentam-se como um elemento impactante, nas três dimensões da sustentabilidade ao longo do seu ciclo de vida (SANCHES, 2009). Por isso, von Sperling (1996) propõe que as Estações de Tratamento de Esgoto Doméstico - ETEs sejam consideradas indústrias aptas a minimamente transformar o insumo “esgoto bruto” em um produto denominado “esgoto tratado”, gerenciando adequadamente seus insumos e resíduos. A adoção de critérios de sustentabilidade na escolha da melhor tecnologia de tratamento e destinação do lodo deve ser levada em consideração (HERNANDEZ-PADILLA et al., 2017). Um sistema sustentável de gerenciamento de resíduos deve ser ambientalmente eficaz, economicamente acessível e socialmente aceitável (NOYOLA, et al., 2013). Além disso, deve ser seguro para os trabalhadores e para a comunidade envolvida, com atenção particular para a possibilidade de afetar os *stakeholders* envolvidos (PADILLA-RIVERA et al., 2016).

A tecnologia de reatores de manta de lodo de fluxo ascendente (UASB/RALF) é a segunda mais empregada em termos de número de instalações de ETEs no Brasil (NOYOLA et al., 2012; BRASIL, 2017) e representa 94,6% das estações existentes no Paraná (ROSS, 2015). A tecnologia apresenta como característica a geração de lodo biológico estabilizado e geração de biogás rico em metano, sendo este último ainda pouco aproveitado para fins energéticos no Brasil. Atualmente, na maioria das ETEs brasileiras, o biogás é queimado em *flare* e emitido para a atmosfera. O lodo e o biogás precisam ser gerenciados de forma ambientalmente correta, sanitariamente segura e economicamente viável (POSSETTI et al., 2015).

Este estudo visa a avaliação da sustentabilidade de diferentes rotas de destinação do lodo biológico e biogás, provenientes de ETEs anaeróbias, dando suporte na seleção de tecnologias a serem empregadas em futuras instalações de tratamento de esgotos sanitários e adequação das existentes.

1.2 JUSTIFICATIVA

A implantação de uma ETE tem um caráter ambientalmente favorável, em virtude de sua contribuição para a diminuição de impactos relacionados à depleção de oxigênio, eutrofização e lançamento de substâncias tóxicas nos corpos receptores e danos à saúde humana (GUTIERREZ, 2014). No entanto, a sua construção e, principalmente, operação possuem potencial para geração de impactos. Os principais subprodutos gerados são o lodo biológico e o biogás, que se não gerenciados adequadamente podem ocasionar impactos ambientais. Nos casos de estações que realizam a remoção de nitrogênio, tem-se ainda a emissão de N_2O , que contribui significativamente para o impacto de mudanças climáticas.

Dependendo do destino final adotado, o lodo biológico precisa ser higienizado, sendo uma das técnicas adotadas no Brasil a Estabilização Alcalina Prolongada (EAP). Segundo Gutierrez et al. (2015), o potencial impacto relacionado à cal virgem para higienização do lodo na rota por ela estudada (lodo sendo higienizado por EAP e disposto para a agricultura) sinalizou a demanda por investigação de alternativas à cal, com vistas a ampliar os créditos dos sistemas que optarem pela utilização do lodo para uso agrícola como destino final. Os autores verificaram, também, a viabilidade de uso do excedente energético da ETE, na forma de biogás, para secagem do lodo.

Estudos preliminares realizados apontam que o tratamento e gerenciamento do lodo biológico e biogás possuem uma contribuição significativa no cálculo do impacto ambiental. Neste sentido, Amaral et al. (2016) realizaram a Avaliação do Ciclo de Vida ambiental (ACV-ambiental) (UF = tratamento de 1 m³ de efluente) de uma ETE dotada de reatores UASBs, o que comprovou que os processos de tratamento e destinação do lodo e queima de biogás em *flare* representam juntos 44% da contribuição para a categoria de mudanças climáticas (de um total de 1,26 kg de CO₂eq.), 36% da contribuição para a categoria de depleção da camada de ozônio (de um total de 1,9x10⁻⁸ kg de CFC-11eq.), 55% para toxicidade humana (de um total de 0,02 kg de 1,4 DBeq.) e 86% para a categoria de acidificação terrestre (de um total de 0,005 kg SO₂eq.). Noyola et al., 2016 verificaram diferentes cenários de tratamento de esgoto e o cenário onde o biogás é utilizado para geração de eletricidade diminuiu em 34% a emissão de CO₂ eq. (para um horizonte de 20 anos).

Nesse sentido, o trabalho contribui para o auxílio na escolha da tecnologia a ser empregada para tratamento e destino final do lodo biológico e biogás, levando em conta aspectos ambientais, econômicos e sociais. Os trabalhos existentes com relação à escolha de tecnologia abordam somente o caráter ambiental e econômico, sendo que não existe ainda metodologia de avaliação de ciclo de vida – social implantada em norma.

1.3 RELEVÂNCIA

Em ETEs, os primeiros estudos usando ACV datam da década de 1990 (COROMINAS, et al., 2013). Em 2013, a *International Water Association* (IWA) instituiu, motivada pelo grande número de trabalhos publicados com o tema e, especialmente, pela ausência de padrões metodológicos para as ACVs, o *IWA working group for life cycle assessment of water and wastewater treatment*. O grupo visa também o desenvolvimento de inventários de ciclo de vida regionais. A Universidade Autônoma do México apresentou, no segundo semestre de 2013, o Informe Técnico intitulado *Water and sanitation: LAC cities adapting to climate change by making better use of their available bioenergy resources* onde são apresentadas ACV dos nove sistemas de tratamento mais utilizados na região da América Latina e Caribe. A Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG está realizando estudos de ACV ambiental em diferentes tecnologias de tratamento de efluentes domésticos, a

fim de incorporar dados aos bancos de inventários de ciclo de vida (GUTIERREZ, 2014).

Em termos de ACV-S, metodologias para a Avaliação dos Impactos Sociais ainda estão em fase de pesquisa e propostas em artigos científicos. Em 2004, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) reconheceu a necessidade de critérios sociais na ACV e foi criado um grupo de trabalho, que resultou no guia: “*Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*” (UNEP SETAC, 2009). Em 2010, foi lançado outro guia dividido por subcategorias de impacto, para ajuda metodológica de como criar indicadores e como obter dados por meio de fonte (UNEP SETAC, 2013). Os guias ajudam na identificação dos *stakeholders*, na criação de indicadores e na indicação de onde obter dados para elaboração, mas não normatizam como deve ser a avaliação dos impactos sociais. Os dois documentos estão voltados para a ACV-S de empresas de produção de bens de consumo. Recentemente, a Universidade Autônoma do México publicou um artigo onde são sugeridos indicadores sociais ligados à ETEs (PADILLA-RIVERA et al., 2016). Os autores utilizaram os *stakeholders* presentes no guia e acrescentam mais cinco indicadores que consideram específicos de ETEs.

Nesse sentido, o que existe atualmente, são estudos de ACV-Ambiental em ETEs e propostas de indicadores sociais associados com ETEs.

O presente trabalho possui relevância no sentido que engloba as três dimensões da sustentabilidade (ambiental, social e econômica), tendo como escopo o gerenciamento do lodo e biogás, contribuindo para a tomada de decisão no gerenciamento dos principais subprodutos de ETE. Além disso, não foram encontrados estudos que avaliem a gestão integrada de lodo e biogás gerados a partir de reatores UASBs, utilizando a técnica de avaliação de ciclo de vida.

A legislação ambiental nacional não contempla impactos ambientais relevantes dessa etapa de operação da ETE. As legislações existentes estão focadas nos parâmetros para lançamento de efluentes (BRASIL, 2011) e limites máximos de certos constituintes no lodo para aplicação agrícola (BRASIL, 2006), não contemplando as emissões ao longo da operação da ETE e tratamento e disposição do lodo biológico e biogás. Os resultados obtidos poderão ser disponibilizados em bancos de dados para auxílio à futuros trabalhos.

1.4 HIPÓTESE

Como hipótese desta tese tem-se que o uso de higienização térmica do lodo, utilizando o biogás, seguido da disposição agrícola, diminui o impacto nas três dimensões da sustentabilidade, sendo a opção mais sustentável para ETEs, de grande porte, que empregam reatores UASB.

1.5 OBJETIVOS

Geral:

Realizar a avaliação da sustentabilidade de diferentes cenários de tratamento e destinação final do lodo biológico e biogás, oriundos de ETE, de grande porte, que empregam reatores anaeróbios do tipo UASB.

Específicos:

Realizar a Avaliação do Ciclo de Vida Ambiental (ACV – A) do tratamento e destinação final do lodo biológico e biogás, sendo o cenário base onde o biogás é apenas queimado em *flare*, e três cenários onde este é utilizado na própria ETE.

Realizar a Avaliação Social do tratamento e destinação final do lodo biológico e biogás, sendo o cenário base onde o biogás é apenas queimado em *flare*, e três cenários onde este é utilizado na própria ETE.

Analisar o Custo de Ciclo de Vida (CCV) do tratamento e destinação final do lodo biológico e biogás, sendo o cenário base onde o biogás é apenas queimado em *flare*, e três cenários onde este é utilizado na própria ETE.

Realizar a avaliação global da sustentabilidade do cenário base e propostos.

1.6 ESTRUTURAÇÃO DA TESE

Esta tese, com base nos objetivos propostos, é estruturada em 6 capítulos principais, 3 apêndices e 2 anexos.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica que norteia os objetivos da tese. Desse modo, são abordados temas relevantes, tais como o conceito da sustentabilidade, avaliação do ciclo de vida, avaliação da sustentabilidade, características e tratamento do lodo biológico e biogás e apresenta estudos que realizaram a ACV para o gerenciamento do lodo biológico.

O capítulo 3.1 apresenta o delineamento do trabalho, dividindo-se em 4 etapas, para atendimento aos objetivos propostos. O capítulo 3.2 apresenta a metodologia para a avaliação ambiental, utilizando-se a avaliação do ciclo de vida. O capítulo 3.3 apresenta a metodologia para a avaliação social, utilizando os indicadores propostos da avaliação do ciclo de vida social. O capítulo 3.4 apresenta a metodologia para a avaliação econômica através da análise dos custos do ciclo de vida. O capítulo 3.5 apresenta a metodologia para a avaliação dos resultados das 3 dimensões da sustentabilidade.

O capítulo 4 apresenta os resultados, subdividido nos 4 objetivos propostos. Finalmente o capítulo 5 apresenta as conclusões da tese e o capítulo 6 as recomendações para trabalhos futuros referente às lacunas encontradas.

Paralelo aos itens descritos, os apêndices e anexos complementam as informações apresentadas nesta tese. O apêndice 1 apresenta os dados utilizados para a análise da incerteza para a avaliação ambiental, o apêndice 2 apresenta os gráficos das medições de H_2S , utilizada para o indicador de odor na avaliação social e o apêndice 3 apresenta detalhadamente o inventário econômico dos 4 cenários avaliados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONCEITO DE SUSTENTABILIDADE

A literatura reúne aproximadamente 160 conceitos ou definições sobre desenvolvimento sustentável e as abordagens diversas são relativas em função do campo ideológico ambiental ou da dimensão em que cada ator se posiciona (BRAGATTO et al., 2012). O conceito lógico de sustentabilidade é a capacidade de uso de um recurso sem que ele se esgote. Nesse sentido, desenvolvimento sustentável é aquele que melhora a qualidade de vida do homem ao mesmo tempo em que respeita a capacidade de produção dos ecossistemas nos quais vivemos (MIKHAILOVA, 2004).

A Organização das Nações Unidas, por meio do relatório Nosso Futuro Comum, publicado pela Comissão Mundial para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento em 1987, elaborou o seguinte conceito (ONU, 1987):

“Desenvolvimento sustentável é aquele que busca atender as necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender suas próprias necessidades”.

O desenvolvimento sustentável procura a melhoria da qualidade de vida de todos os habitantes do mundo sem aumentar o uso de recursos naturais além da capacidade da Terra. Enquanto o desenvolvimento sustentável pode requerer ações distintas em cada região do mundo, os esforços para construir um modo de vida verdadeiramente sustentável requerem a integração de ações em três áreas-chave: crescimento e equidade econômica, conservação de recursos naturais e do meio ambiente e desenvolvimento social (MIKHAILOVA, 2004).

Um dos desafios da construção do desenvolvimento sustentável é criar instrumentos de mensuração capazes de prover informações que facilitem a avaliação do grau de sustentabilidade das sociedades, produtos e processos, monitorem as tendências de seu desenvolvimento e auxiliem na definição de metas de melhoria (POLAZ; TEIXEIRA, 2009).

2.2 OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Em 2000, com o apoio de 191 nações, os líderes mundiais se reuniram na sede das Nações Unidas e criaram os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), sendo eles: 1) Acabar com a fome e a miséria; 2) Educação básica de qualidade para todos; 3) Igualdade entre sexos e valorização da mulher; 4) Reduzir a mortalidade infantil; 5) Melhorar a saúde das gestantes; 6) Combater a AIDS, a malária e outras doenças; 7) Qualidade de vida e respeito ao meio ambiente e 8) Estabelecer parcerias para o desenvolvimento (ODM, 2018).

De acordo com ONU, progressos expressivos foram concretizados em relação aos atingimentos dos ODM como, contínua diminuição da pobreza global; mais crianças frequentando a escola primária; queda das mortes infantis maneira drástica; aumento do acesso a água potável; e milhões de pessoas salvas devido as metas de investimento para combater a malária, a aids e a tuberculose.

Em 2015, líderes dos 193 Estados-membros das Nações Unidas aprovaram, por consenso, em Nova Iorque, a adoção da Agenda 2030 e dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (FIGURA 1) composta por 169 metas a serem atingidas até 2030. Os ODS substituem os ODM e possuem como objetivo estruturar os esforços globais em prol da erradicação da pobreza, promoção de bem-estar para todos e proteção ao meio ambiente. Nesse sentido, a preocupação está em integrar os três pilares do desenvolvimento (social, econômico e ambiental) (ODS, 2018).

FIGURA 1 - OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - ONU



Fonte: ONU (2017).

Os ODS estão relacionados às necessidades humanas e referem-se a temas ligados à saúde, educação, pobreza, alterações climáticas, saneamento básico e sustentabilidade. O saneamento é uma vertente de extrema importância para a promoção da saúde e bem-estar da população.

Os ODS que estão direta e indiretamente ligados a questão do saneamento são os objetivos (3) Saúde e Bem-estar, (6) Água Potável e Saneamento, (7) Energia Limpa e Acessível, (8) Trabalho decente e crescimento econômico, (11) Cidades e comunidades sustentáveis, (13) Ação contra a mudança global do clima, (14) Vida na água e (17) Parcerias e meios de implementação.

2.3 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE

2.3.1 Relatório de Sustentabilidade – GRI

O Global Reporting Initiative (GRI) é um padrão mundial de relatório anual, transparente, que contempla amplamente o desempenho integrado da organização e relata não apenas o desempenho passado, mas aponta para compromissos futuros. O modelo GRI de relatório é aceito pela ONU para ser submetido pelas entidades signatárias do Pacto Global (UNDP, 2015).

O Pacto Global foi lançado pelo então secretário da ONU, Kofi Annan, em 2000. O Pacto é uma iniciativa que tem como meta mobilizar as empresas para, juntamente com outros atores sociais, contribuam para a construção de uma economia global mais inclusiva e sustentável. A iniciativa baseia-se em direitos universalmente conhecidos para avançar na responsabilidade social corporativa, disseminando boas práticas empresariais dentro de princípios reconhecidos, com transparência e diálogo. A adesão formal é feita por meio do encaminhamento de uma carta ao Secretário Geral da ONU na qual declara seu compromisso em respeitar os dez princípios básicos da sustentabilidade (UNDP, 2015).

Em termos quantitativos, o Pacto aceita a utilização dos indicadores GRI e ETHOS como comprovação.

2.3.2 Indicadores Ethos de Sustentabilidade

O Instituto Ethos é uma organização não governamental que tem como missão mobilizar, sensibilizar e ajudar as empresas a gerirem seus negócios de forma socialmente responsável, tornando-as parceiras na construção de uma sociedade mais justa e sustentável (ETHOS, 2017). Não é uma entidade certificadora.

Possui cerca de 40 indicadores com suas respectivas correlações com os Princípios do Pacto Global, Indicadores GRI e Objetivos de Desenvolvimento do Milênio das Nações Unidas. Os indicadores são uma ferramenta de gestão, onde a empresa pode se auto-avaliar anualmente quanto ao seu desempenho em sustentabilidade e se comparar com os *benchmarks* nacionais.

Os indicadores ETHOS são preenchidos em uma escala evolutiva, são processados, transformados em pontuação e apresentados no Relatório de Diagnóstico (ETHOS, 2017). Após o preenchimento é apresentada uma comparação por meio de tabelas e gráficos com o grupo de *benchmarking* (as 10 empresas com as melhores notas) e com a média do grupo de empresas que responderam ao questionário no mesmo período (ETHOS, 2015).

2.3.3 Accountability 1000 (AA 1000)

A AA 1000 é uma norma de desempenho social criada em 1999 pelo *Institute for Social and Ethical Accountability* (ONG britânica), especializada na Responsabilidade Social e Ética. É uma das mais disseminadas normas de Responsabilidade Social em nível internacional. Oferece um quadro de referências (ou *benchmarking*) na base do qual as empresas podem definir os seus próprios valores e objetivos em matéria de desempenho social e ético e promover o diálogo com as partes interessadas.

A norma ajuda as empresas na identificação do que é relevante em termos de sustentabilidade e na definição de uma estratégia de inclusão das partes interessadas (ACCOUNTABILITY, 2015).

2.3.4 Social Accountability 8000 (SA 8000)

A SA 8000 é a única norma que certifica as empresas em função da sua responsabilidade social. Baseia-se em uma evolução do conceito de qualidade, tal

como a norma ISO 9001, mas junta elementos de respeito pelos direitos humanos baseados nas regras da Organização Internacional do Trabalho, Convenção das Nações Unidas sobre os Direitos das Crianças e da Declaração dos Direitos Humanos. A norma permite às empresas a avaliação dos seus locais de produção assim como dos seus fornecedores e subcontratados.

O objetivo da aplicação da norma é estabelecer requisitos para a responsabilidade social visando a empresa a desenvolver, manter e reforçar políticas e procedimentos para gerenciar aqueles assuntos sobre os quais ela possui controle ou influência. Também demonstra às partes interessadas que políticas, procedimentos e práticas estão em conformidades com os requisitos da norma (SAI 8000, 2015).

2.3.5 Indicador de Sustentabilidade Empresarial da Bolsa de Valores de São Paulo – ISE BOVESPA

O ISE BOVESPA foi lançado em 2005. É um conjunto de mais de 100 indicadores de sustentabilidade empresarial de última geração, cobrindo os temas de: natureza do produto, características gerais do negócio, governança corporativa, desempenho econômico financeiro, desempenho ambiental e desempenho social.

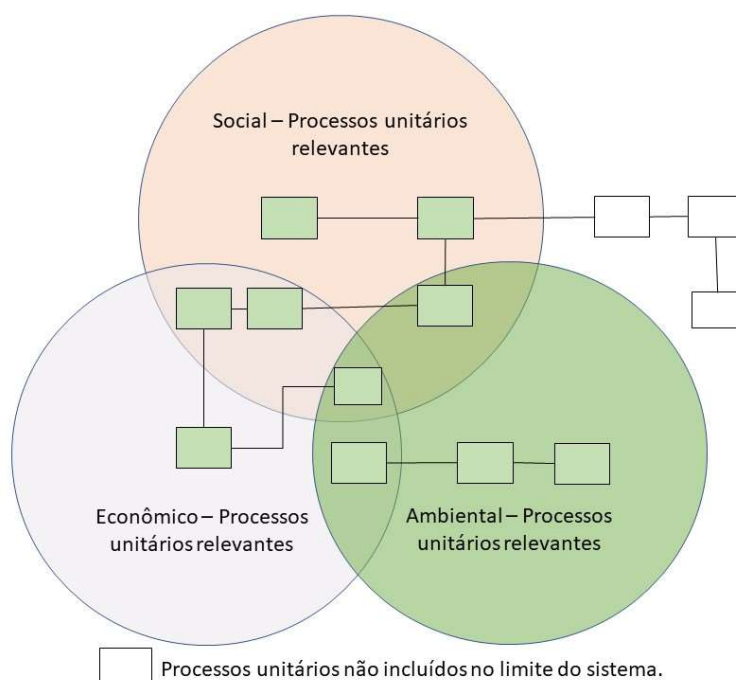
Para a seleção das empresas que compõem o ISE, a Bovespa encaminha anualmente questionário às companhias emissoras das ações com maior liquidez e seleciona, entre essas, no máximo 40, por meio do método de *clusters*. As ações das empresas selecionadas compõem o índice por 12 meses e caso queiram permanecer na carteira tais empresas devem evoluir consistentemente em suas práticas de sustentabilidade (ISE BOVESPA, 2016).

2.4 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DO CICLO DE VIDA (ASCV)

A ASCV é uma metodologia e uma ferramenta de apoio a decisão baseada em uma abordagem sistemática que busca verificar o nível de sustentabilidade (impactos ambientais, econômicos e sociais) de um produto, serviço ou processo dentro do ciclo de vida do objeto em estudo, ou seja, do berço ao túmulo (NGUYEN et al., 2017; ZORTEA, 2015). Essa metodologia deriva da ACV ambiental (ACV-A), onde ao se pensar na questão do desenvolvimento sustentável, a ACV foi repensada a fim de

englobar os aspectos econômicos e sociais. Dessa forma, este planejamento, baseado nos princípios da sustentabilidade, resultou na incorporação das metodologias denominadas: Custos do Ciclo de Vida (CCV) e Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACV-S). Portanto, a ASCV acabou sendo uma agregação da ACV-A, CCV e ACV-S (ZORTEA, 2015; TRAVERSO, et al., 2012; UNEP/SETAC, 2011), conforme apresentado na FIGURA 2.

FIGURA 2 - LIMITES DO SISTEMA DE UMA AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE DO CICLO DE VIDA (ASCV).

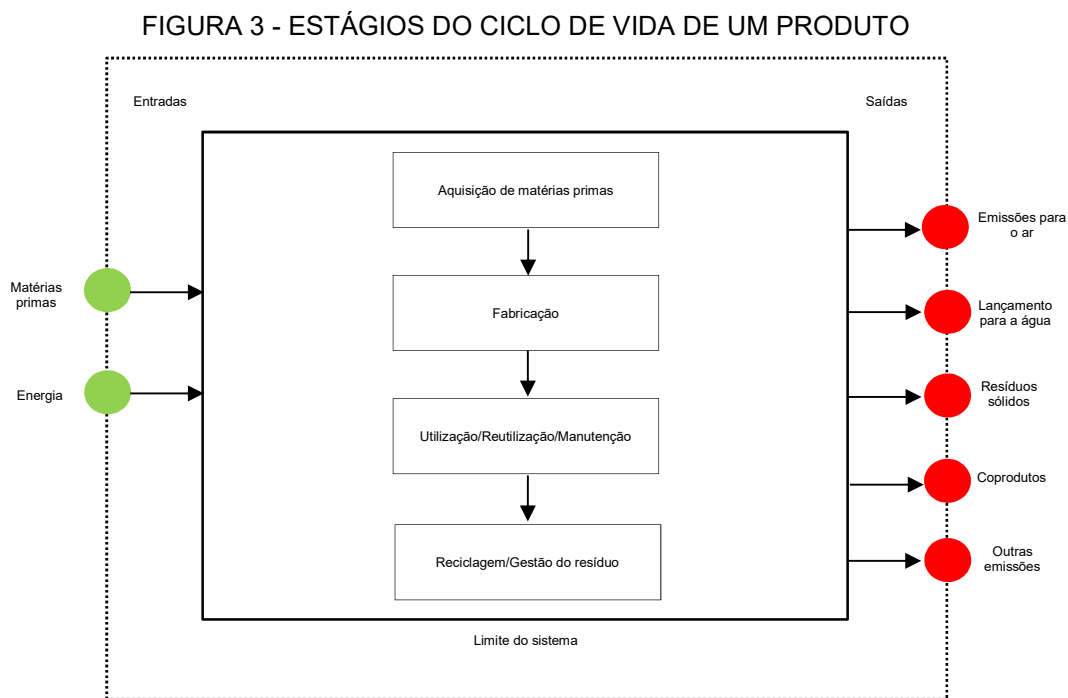


FONTE: Adaptado de UNEP/SETAC (2011).

2.4.1 Avaliação do ciclo de vida – Ambiental (ACV-A)

A Avaliação do Ciclo de Vida - ACV é uma entre as várias técnicas de gestão ambiental (por exemplo, avaliação de risco, avaliação de desempenho ambiental, auditoria ambiental e avaliação de impacto ambiental) com o objetivo de identificar os possíveis impactos associados aos produtos/serviços, tanto na sua fabricação quanto no consumo. É uma metodologia utilizada para o estudo das cargas ambientais associadas aos diversos estágios de um sistema ou produto, pelo levantamento e quantificação da energia e dos materiais necessários (entradas) e dos resíduos e emissões liberados ao meio ambiente (saídas). Como instrumento de gestão, a ACV permite ao responsável pela decisão escolher uma alternativa considerando seus

aspectos técnicos e seu desempenho ambiental, além de auxiliar na identificação de oportunidades de melhoria no ciclo de vida em estudo. A FIGURA 3 apresenta os possíveis estágios de ciclo de vida que podem ser considerados em uma ACV e as típicas entradas/saídas medidas.

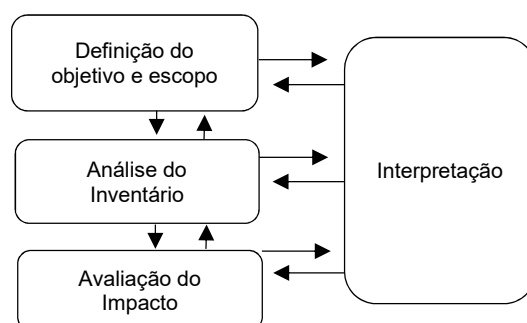


FONTE: Adaptado de GUTIERREZ (2014), USEPA (2006).

2.4.1.1. Fases do estudo de ACV

Um estudo de ACV é composto de quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação, conforme ilustrado na FIGURA 4.

FIGURA 4 - FASES DE UMA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA



FONTE: Adaptado de ABNT (2009a).

Fase 1: Definição de objetivo e escopo

Esta etapa busca definir o propósito e extensão do estudo, a partir do estabelecimento de suas fronteiras, ou seja, quais processos envolvidos no ciclo de vida do objeto avaliado serão abordados ou não. Segundo a Norma ISO 14.040 “o objetivo de um estudo ACV deve expor de forma não ambígua a aplicação planejada, as razões para levar a cabo o estudo e a audiência pretendida, como por exemplo, a quem são comunicados os resultados do estudo”.

A ACV é baseada na unidade funcional, que nada mais é do que a quantificação da função. A quantidade de produto que supre a unidade funcional é denominada de fluxo de referência (UGAYA, 2013). Todas as entradas e saídas no Inventário de Ciclo de Vida (ICV) e, conseqüentemente, o perfil da AICV, estão relacionados à unidade funcional.

Para evitar que todos os processos antropogênicos sejam incluídos, podem ser utilizados critérios de cortes físicos, econômicos ou ambientais para delimitar o sistema de produto.

Os dados a serem selecionados para uma ACV podem ser coletados nos locais de produção associados aos processos elementares dentro da fronteira do sistema, ou podem ser obtidos, ou calculados a partir de outras fontes. Dessa forma, na prática, os inventários podem incluir dados medidos, calculados ou estimados. Normalmente, também, são usados bancos de dados (BD) como apoio. Esses BD devem ser constituídos por informações de caráter ambiental (como gasto de materiais e energia, de emissões atmosféricas, de efluentes líquidos e de resíduos sólidos), sobre a produção de bens de consumo, disponibilização de recursos energéticos e, ainda, a respeito da realização de serviços (ABNT, 2009). A compilação dessas informações perfaz o inventário de ciclo de vida, ou ICV (ABNT, 2009; UGAYA, 2013; GUTIERREZ et al., 2016).

Fase 2: Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)

A fase de análise de inventário do ciclo de vida (ICV) trata-se de um inventário dos dados de entrada/saída associados ao sistema em estudo. Essa fase envolve a coleta dos dados necessários para o alcance dos objetivos do estudo em questão.

A norma ISO 14.044 ainda sugere que medidas que assegurem o entendimento uniforme e consistente dos sistemas sejam adotadas, tais como, o

desenho de fluxogramas gerais dos processos e a listagem de fluxos e de dados relevantes para as condições de operação associadas a cada processo elementar, e das unidades utilizadas (GUTIERREZ, 2014).

A dificuldade na análise do ICV é que uma pequena quantidade de um determinado fluxo pode ter maior relevância em termos ambientais do que uma grande quantidade de outro fluxo. Além disso, a quantidade de fluxos elementares pode aumentar significativamente, o que dificulta a análise. Como decorrência, houve a necessidade de realizar a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) (UGAYA, 2013).

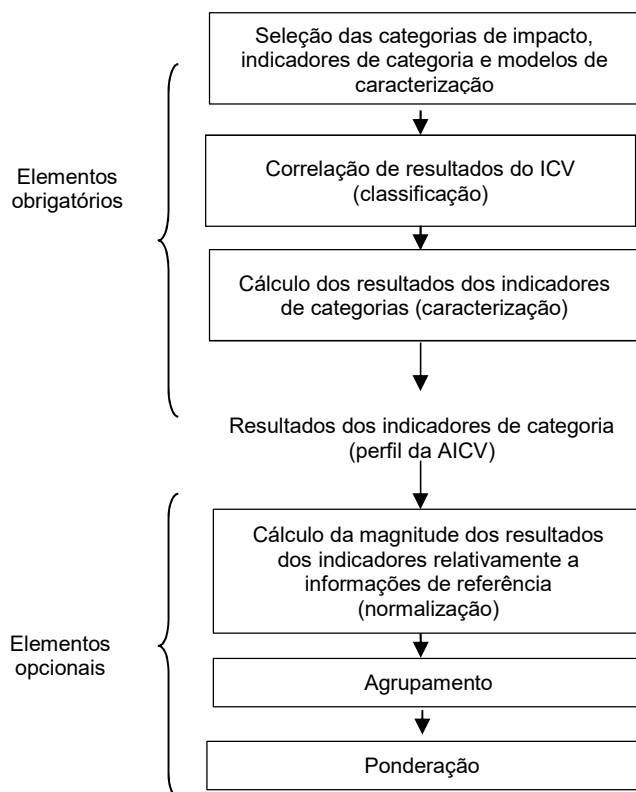
Fase 3: Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)

A fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) tem como objetivo prover informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto, visando ao melhor entendimento de sua significância ambiental (ABNT, 2014a).

De acordo com a NBR ISO 14044 (ABNT, 2014b), a obtenção dos valores até a caracterização é obrigatória, conforme apresentado na FIGURA 5. Entretanto para facilitar a avaliação, elementos opcionais, como a normalização, o agrupamento e a ponderação podem ser utilizados.

A AICV associa os resultados do ICV a categorias de impacto. Para cada categoria de impacto, é selecionado um indicador (resultado do indicador); o conjunto dos resultados dos indicadores (resultados da AICV) ou perfil da AICV fornece informações sobre as questões ambientais associadas às entradas e saídas do sistema de produto (UGAYA, 2013).

FIGURA 5 - ELEMENTOS OBRIGATÓRIOS E OPCIONAIS PARA A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA



FONTE: Adaptado de ABNT (2009a).

Nessa fase podem ser utilizados *softwares* específicos, como o openLCA, SimaPro, GaBi, Umberto e Quantis. O mais utilizado mundialmente é o SimaPro, que foi desenvolvido pela empresa holandesa Pré Sustainability (JUNQUEIRA, 2016). Com relação à avaliação dos impactos, existem inúmeros métodos de avaliação, como o TRACI, IMPACT 2002+, EPS 2000, ReCiPe entre outros. O ReCiPe, é uma evolução do método CML. O método CML, desenvolvido por cientistas da *Center of Environmental Science of Leiden University* foi, durante bastante tempo, o método mais utilizado nos trabalhos sobre ACV, devido às abrangentes categorias que considerava e por sua "abordagem orientada ao problema ambiental". No entanto, em 2008, surgiu o método ReCiPe, apresentado como uma evolução desse método, que juntava o CML (orientado ao problema) e o método Eco-Indicator 99 (orientado ao dano ambiental). Esse, então, passou a ser o método mais qualificado, e, portanto, mais utilizado dentro dos novos estudos, mesmo naqueles que consideram categorias de impacto avulsas/isoladas/reduzidas (MENDES, 2013). O método CML organiza os

impactos em 18 categorias e o Eco-Indicator 99 em apenas três: Saúde Humana, Ecossistemas e Custos excedentes de recursos. O método ReCiPe inclui essas duas estratégias. Pesos são associados a estes últimos e os fatores ambientais da CML podem ser multiplicados por esses pesos (fatores de impacto) para agrega-los nessas três categorias, o que pode facilitar a análise (PRÉ, 2015).

Fase 4: Interpretação do ciclo de vida

A interpretação do ciclo de vida é a fase final do procedimento ACV, na qual os resultados de um ICV e/ou de uma AICV, ou de ambos, são sumarizados e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivos e escopo.

Com os dados obtidos pela ACV é possível determinar a quantidade de recursos naturais necessários, o consumo de energia e os resíduos gerados no processo. Alguns trabalhos tratam a ACV como uma técnica de análise de recursos e perfis ambientais dos produtos utilizada para avaliação e tomada de decisão em nível de gerência, visando a melhoria da qualidade do produto e a conservação do meio ambiente. De uma forma geral dois objetivos podem ser considerados principais na Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos. O primeiro é determinar quais são as matérias-primas utilizadas e as emissões geradas durante o ciclo de vida do produto estudado. O segundo é determinar quais são os impactos das emissões e do consumo das matérias-primas sobre o meio ambiente (PRADO, KASKANTZIS, 2005).

A ACV pode subsidiar na identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de serviços em diversos pontos de seus ciclos de vida, no nível de informação dos tomadores de decisão (visando, por exemplo ao planejamento estratégico, à definição de prioridades ou ao projeto ou reprojeção de processos) e à seleção de indicadores de desempenho ambiental relevantes (ABNT, 2009).

Para a análise de incerteza em ACV é utilizada a Matriz Pedigree. A matriz foi introduzida no campo da ACV por Weidema e Wesnaes (1996) e é aplicada ao banco de dados do Ecoinvent desde 2005. A matriz considera dois tipos de parâmetros de incertezas: variabilidade intrínseca e incerteza devida à utilização de dados imperfeitos, devido à utilização de dados resultados de estimativas sem a verificação da extrapolação temporal, espacial ou uso de tecnologias diferentes (MULLER et al., 2014). Os indicadores considerados são: confiança, completeza, correlação temporal,

correlação geográfica e correlação tecnológica. A matriz é apresentada no apêndice 1.

2.4.2 Avaliação de Ciclo de Vida Social - (ACV – S)

A Avaliação de Ciclo de Vida Social (ACV – S) é uma técnica de avaliação que tem como objetivo avaliar os aspectos sociais e sócios-econômicos dos produtos e seus potenciais impactos positivos e negativos ao longo de seu ciclo de vida, englobando a extração, processamento de matérias-primas, produção, distribuição, uso, reutilização, manutenção, reciclagem e disposição final. A ACV – S complementa a ACV – A, podendo ser aplicada sozinha ou em conjunto (UNEP/SETAC, 2009).

A ACV-S é considerada uma metodologia nova na comunidade científica. Métodos de avaliação de subcategorias estão disponíveis desde 2006, mas alguns deles não incluem todas as subcategorias do Guia (RAMIREZ, 2013).

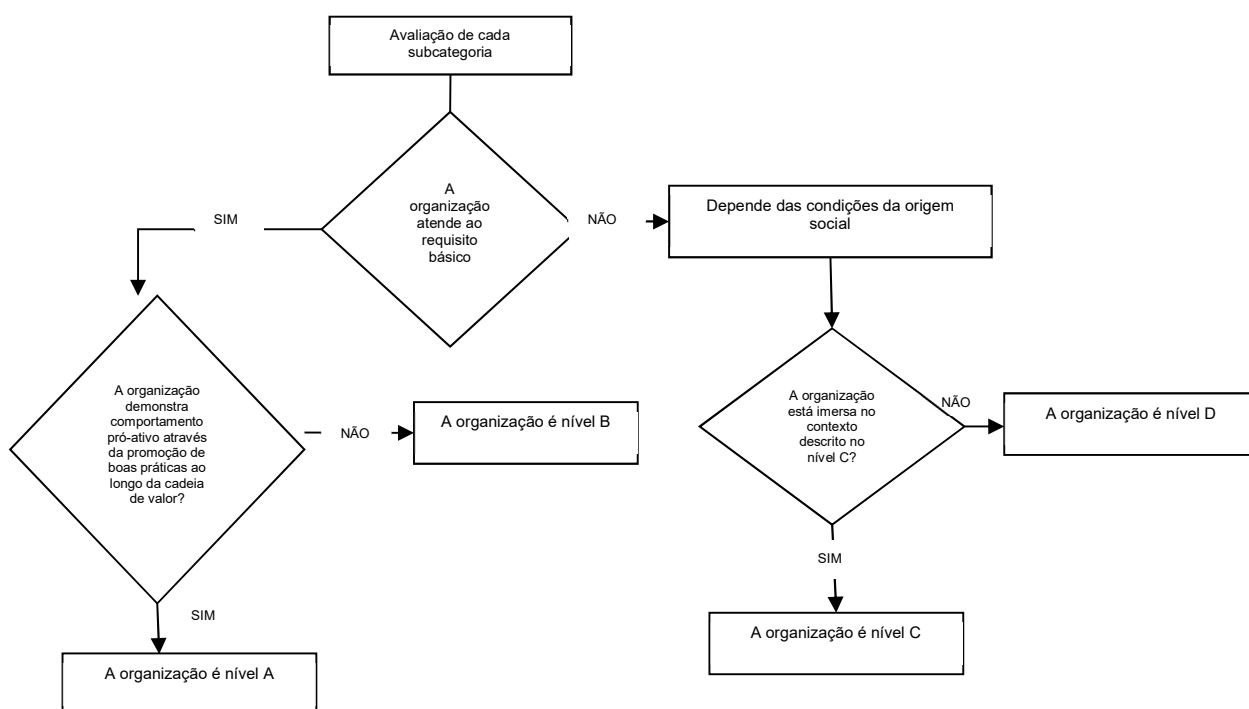
A elaboração do Guia teve início em 2004 quando o Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas (UNEP) reconheceu a necessidade de critérios sociais na ACV. Criou-se um grupo de trabalho, que resultou no guia: “*Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*” (UNEP/SETAC 2009). Em 2013, lançou-se outro guia dividido por subcategorias de impacto para ajuda metodológica de como criar indicadores e como obter dados a partir da fonte (UNEP/SETAC, 2013).

O Guia estabeleceu cinco categorias de *stakeholders*: trabalhadores, consumidores, comunidade local, sociedade e cadeia de valor. Para cada categoria estabeleceram-se subcategorias de impacto.

Existem mais de 20 métodos para avaliação dos impactos sociais. Em 2013, desenvolveu-se uma metodologia de avaliação de subcategoria: *Subcategory Assessment Method (SAM)*. Esse método, elaborado com base no guia metodológico da UNEP/SETAC (2013), pode ser considerado um modelo de caracterização, utilizado após a fase de elaboração do inventário, e permite avaliar o desempenho social da empresa em todas as fases do ciclo de vida do produto. O método consiste em quatro elementos: a) a utilização da organização como processo unitário, b) definição de um requisito base para avaliar as subcategorias, c) atribuição de níveis de avaliação, e d) atribuição de um carácter quantitativo para o método (RAMIREZ et al., 2014).

A fim de produzir um método consistente para todas as subcategorias, o modelo estabelece uma linha de base para avaliar o perfil da organização, chamado requisito básico (RB). Como exemplo, na subcategoria “salário justo”, o modelo estabelece o salário mínimo como RB. Alguns RBs são provenientes de acordos internacionais ou de indicadores da gestão da organização. Esse foi o caso da subcategoria "igualdade de oportunidades / discriminação do trabalhador das partes interessadas". O guia metodológico cita "oportunidade justa" e descreve que "todo mundo tem o direito de ser tratado de forma justa e ter acesso à igualdade de oportunidades". Nesse caso, nenhuma medida prática para a organização foi identificada. Portanto, SAM utiliza como critério a presença de um sistema de gestão, política ou ação para prevenir a discriminação e promover a igualdade de oportunidades para os trabalhadores. Na maioria das subcategorias, 76,67% o requisito básico é baseado em indicadores relativos à gestão da organização, 3,33% em estatísticas nacionais e 20% sobre acordos internacionais (RAMIREZ et al., 2014). Para a atribuição dos níveis de avaliação, o modelo aplica 4 diferentes níveis (A, B, C e D), conforme apresentado na FIGURA 6.

FIGURA 6 - ETAPAS PARA A ANÁLISE DAS SUBCATEGORIAS DOS INDICADORES SOCIAIS



FONTE: RAMIREZ et al. (2014).

O Anexo 1 apresenta os requisitos básicos para cada subcategoria desenvolvida pelo método apresentado por Ramirez et al. (2014).

Para a atribuição de um caráter quantitativo ao método foi utilizada uma escala de acordo com o nível que a organização se encontra no atendimento de cada requisito. A escala utilizada é de 1 à 4 para a classificação dos níveis, conforme demonstrado na TABELA 1.

TABELA 1 - TRANSFORMAÇÃO DA ESCALA QUALITATIVA PARA SEMI-QUANTITATIVA PARA A AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS SOCIAIS.

Escala	A	B	C	D
Valor numérico	4	3	2	1

Com relação à avaliação de aspectos sociais associados à ETEs, Padilla-Rivera et al. (2016) selecionaram 25 indicadores relacionados à 4 stakeholders (comunidade e sociedade, trabalhadores, consumidores e cadeia de valor. Para realizar a avaliação dos aspectos, os autores utilizaram ponto de referência e requisito básico, transformando os dados qualitativos em semi-quantitativo, assim como proposto por Ramirez et al. (2014). A escala variou de 1 a 4 (sendo 1 a pior e 4 a melhor avaliação). Os autores aplicaram o método para comparação de duas ETEs localizadas no México (uma rural e outra urbana). A instalação urbana apresentou um melhor desempenho em 3 das 4 partes interessadas avaliadas.

2.4.3 Avaliação dos Custos no Ciclo de Vida – (CCV)

Os Custeios do Ciclo de Vida (CCV) pode ser definido como um método de calcular o custo total da propriedade durante toda a vida útil de um ativo (ONG et al., 2012). Nessa conceituação, é considerado, além do custo inicial, todos os subsequentes custos esperados, assim como o valor residual e quaisquer outros benefícios quantificáveis a serem derivados. Consequentemente, a técnica do CCV é utilizada quando há uma decisão sobre compra de um ativo que exigirá substanciais custos de operação e manutenção durante sua vida útil (GUNDES, 2016). Nesse sentido, pode-se concluir que do ponto de vista econômico, é preferível pagar um alto custo inicial, porém incorrer em menores custos subsequentes em função de manter a propriedade de um ativo qualquer. Por outro lado, o crescimento dos custos de energia, mão de obra, e bens de capital trouxe, como consequência, a necessidade

de maior atenção aos custos do ciclo de vida da compra de um ativo. Por exemplo, a decisão sobre compra de um equipamento implica em se indagar em que custos o comprador incorrerá para a instalação, manutenção e operação do equipamento, depois de sua aquisição (YOSHITAKE, 1995). Vários estudos indicam que frequentemente o custo de posse, incluindo logística e manutenção, podem superar de dez a cem vezes o custo inicial de aquisição (DHILLON, 2013).

A utilização desse tipo de avaliação pode auxiliar na verificação dos custos existentes em cada etapa de ciclo de vida de um determinado produto, ajudando no reconhecimento de gastos com aquisição, operação, manutenção, transporte e disposição final (DHILLON, 2013).

A avaliação dos custos sobre o ciclo de vida de cada produto mostra um outro ponto de vista. Os produtos agregam energia no decorrer da cadeia produtiva. Assim, o produto final é um produto com valor energético agregado onde o desperdício trará a perda desse valor energético agregado. Portanto, termos como eficiência no processo de transformação matéria prima/produto, reutilização e reciclagem acabam se tornando fatores importantes para a CCV (ZORTEA, 2015).

Nos estudos de CCV, os custos são convertidos para o Valor Presente Líquido (VPL), que é uma ferramenta para comparar o valor monetário atual de um investimento para o valor desse investimento no futuro (HUPPES et al., 2004; ONG et al., 2012; LIM et al., 2008; NGUYEN et al., 2017). O cálculo do VPL é o seguinte:

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (R\$) \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que, “n” é o período de avaliação (ano), “r” é a taxa de desconto, “C_t” é o custo estimado no ano “t”. A taxa de desconto “r” é o fator chave na estimativa do VPL principalmente influenciada pela inflação e taxa de juros (DAVIS et al., 2005; NGUYEN et al., 2017).

Com relação à ACCV aplicado em ETEs, Sampaio e Gonçalves (1999) relataram sete itens integrantes dos custos de operação e manutenção para um tratamento baseado em lodos ativados com capacidade nominal de 7,0 m³/s. A estação analisada pelos autores foi a ETE de Barueri, localizada no Estado de SP, e os custos foram subdivididos nos seguintes itens: pessoal, encargos e benefícios;

energia elétrica, materiais de tratamento; serviços; água; materiais e rateio de despesas de pessoal de apoio.

Rebitzer et al. (2003) estudaram a avaliação do custeio de ciclo de vida em uma ETE em diferentes cenários de aplicação de produtos químicos auxiliares para tratamento do lodo biológico. Como resultado, observou-se que parte significativa dos impactos e custos estavam ligados à secagem e ao transporte do lodo. A redução da distância de transporte e conteúdo de água no lodo são apontados como medidas para redução dos encargos financeiros e impactos ambientais. Ainda, como proposta para redução da quantidade de água, indicou-se a utilização de produtos químicos, os quais aumentam o custo de produção, mas geram economia na etapa de destinação. Com o uso desses produtos, e consequentemente a obtenção de menor volume de lodo a ser destinado, observa-se significativa redução do custo total por pessoa por ano.

Apesar da diferença de eficiência de remoção de carga orgânica, Bhoeye et al. (2016) analisaram duas ETEs baseadas em diferentes tecnologias, sendo a primeira por reator UASB e a segunda por lodos ativados. Para as duas estações, coletaram-se informações de custos iniciais de construção, custos anuais de operação, manutenção e eletricidade. Os autores concluíram que o custo de ciclo de vida para a tecnologia UASB é mais barato, em virtude do menor valor operacional. A unidade funcional empregada foi o MDL (Mega Litros Diário).

2.4.4 Ferramentas para a avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida

Entre as ferramentas para a avaliação da sustentabilidade de um sistema, o Índice de Impacto Inclusivo (Triple I), desenvolvido pela *Inclusive Marine Pressure Assessment and Classification Technology (IMPACT)* em 2006 (OTSUKA, 2012; NGUYEN et al., 2017), seguindo a teoria da ASCV considera os impactos ambientais, sociais e econômicos ao longo do ciclo de vida do sistema estudado. Emprega a pegada ecológica, fluxo financeiro e os riscos ambientais (humanos e ecológicos) e integra em um único índice da área produtiva biológica a média mundial para um determinado ano em termos dos chamados hectares globais (gha). É uma ferramenta que pode ser usada para avaliação da sustentabilidade e uma ferramenta transfronteiriça para comparar tecnologias e produtos entre vários países, devido à

aplicação da unidade hectare (NGUYEN et al., 2017). A equação para determinação é:

$$III = [(EF - BC) + \gamma ER] + \alpha [(C - B) + \beta HR] \text{ (gha)} \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que, “III” = Inclusive Impact Index, “EF” = Pegada ecológica (gha), “BC” = Biocapacidade (gha), “ER” = Risco ecológico, “C” = Custo (US \$), “B” = Benefício (US \$), HR = Risco humano, α , β e γ são os fatores de conversão de ER para EF, HR para C e de valor econômico (US \$) para valor ambiental (gha), respectivamente.

Outra ferramenta, utilizada por Zortea (2015), é o indicador de sustentabilidade *Dashboard of Sustainability* (DoS). Um “software” que pondera todos os indicadores para uma mesma escala, representando os mesmos em forma matemática ou gráfica. Foi desenvolvido em 1999 pelo *Consultative Group on Sustainability Development Indicators* (CGSDI). O DoS é um modelo que reúne indicadores relacionados ao bem-estar humano, ecológico, econômico e institucional que representam os fluxos e estoques, que influenciam no desenvolvimento sustentável. A visualização dos indicadores se dá graficamente através de um painel de controle, similar a painéis de controles automotivos, ilustrado a partir das cores vermelha (situação crítica), amarela (situação intermediária) e verde (situação excelente), passando por nove variações de cores. É determinada uma pontuação entre 0 e 1000 pontos, sendo zero pontos para o pior caso possível e 1000 pontos para o melhor. Baseado nesta determinação calcula-se os casos intermediários utilizando uma interpolação linear entre estas duas delimitações determinadas. O índice de sustentabilidade global ou *Sustainable Development Index* (SDI) constitui-se num índice agregado dos vários indicadores representados pelos mostradores citados anteriormente, que é determinado por uma função adicional que calcula a média destes indicadores para que se possa chegar ao SDI. Quanto à importância de cada indicador, o método admite que todos os indicadores, dentro de cada tema, têm peso igual. No entanto, é possível atribuir pesos diferentes para cada indicador. O software foi introduzido por Traverso e Finkbeiner (2009) (UNEP/SETAC, 2011). Os indicadores de sustentabilidade auxiliam na apresentação dos resultados de forma agregada e individual.

A utilização de indicadores de sustentabilidade é sugerida por Finkbeiner et al. (2010), Halog e Manik (2011), UNEP/SETAC (2011) e Traverso et al. (2012). Todos

os autores citados sugerem a utilização do DoS, chegando a sugerir uma forma de ASCV denominada como *Life Cycle Sustainability Dashboard* (LCSD) (ZORTEA, 2015).

Sanches (2009) realizou a avaliação da sustentabilidade, levando em conta algumas diretrizes propostas por Bollmann (2009) e alguns princípios das técnicas multiobjetivos. Como foram analisadas as três dimensões, que apresentam características conflitantes entre si, foi realizada a forma geométrica podendo-se visualizar qual cenário fica mais perto da solução ideal. Como forma de estruturar os indicadores das três dimensões, foi considerado o princípio da normalização. Desta forma, os impactos ambiental, econômico e social maiores, em valor, foram considerados como tendo o valor 1,0 (maior impacto) e os demais foram referenciados em relação a este. Os resultados foram apresentados através da tríade da sustentabilidade, para melhor visualização e comparação. Quanto menor e mais centrada for a área, mais próximo da condição de sustentabilidade estará.

2.5 ESTUDOS QUE REALIZARAM A AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE

A TABELA 2 apresenta os estudos que realizaram a avaliação da sustentabilidade utilizando-se a ferramenta de avaliação do ciclo de vida.

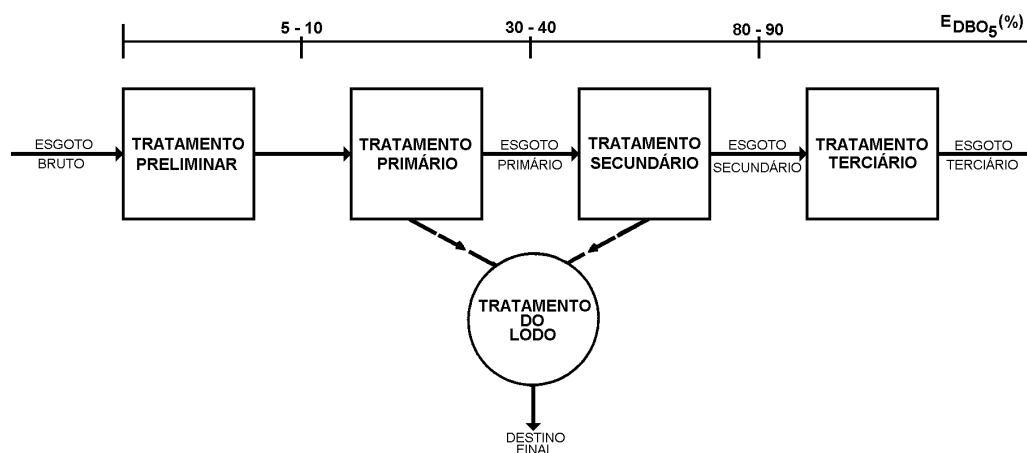
TABELA 2 - ESTUDOS QUE REALIZARAM A AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE UTILIZANDO COMO FERRAMENTA A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.

Autor	Título	Modelos utilizados	Comentários
Rafael Batista Zortea (2015)	Uso da Análise do Ciclo de Vida (ACV) para a Verificação da Sustentabilidade do Biodiesel da Soja no Rio Grande do Sul	- ACV-A, - ACV-S e - ASCV.	Utilizou, após as 3 avaliações, o indicador de sustentabilidade <i>Dashboard of Sustainability</i> (DoS).
Geraldo Antônio Reichert (2013)	Apoio à tomada de decisão por meio da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos: o caso de Porto Alegre	- ACV – A - Avaliação social – Proposta por Den Boer et al. (2005), - Custos econômicos conforme curvas apresentadas por Tsilemou e Panagiotakopoulos (2005)	Na etapa de elaboração do inventário utilizou o programa IWM-2. Para a avaliação dos impactos utilizou a metodologia CML 2001.
Andrea Sanches (2009)	Avaliação da sustentabilidade de sistemas de tratamento de esgotos sanitários: uma proposta metodológica	- Utilizou o conceito de ACV-A; - LCC - Simplificação do modelo ECP-Social	Não utilizou software e modelo de avaliação para os impactos.
Helen E. Muga, James R. Mihelcic (2008)	Sustainability of wastewater treatment technologies	Utilizou indicadores específicos.	Não realizou ACV.

2.6 TECNOLOGIAS EMPREGADAS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS

Os níveis de tratamento de efluentes domésticos se dividem em preliminares, primário, secundário e terciário, englobando ainda as etapas de tratamento e disposição final de seus subprodutos gerados, conforme demonstrado pela FIGURA 7.

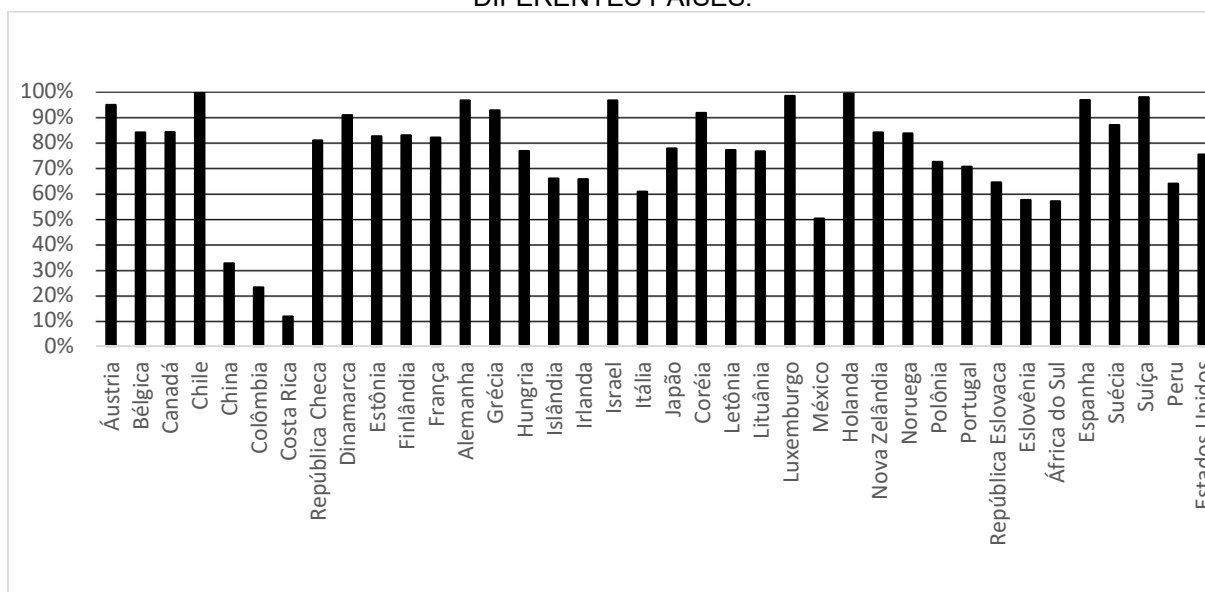
FIGURA 7 – FLUXOGRAMA TÍPICO DE UMA ETE COMPLETA



FONTE: AISSE (2000)

O grau de desenvolvimento e nível de tratamento pode variar muito entre os diferentes países. Por exemplo, em países como Áustria, Chile, Alemanha, Holanda e Suíça, mais de 90% da população está ligada a uma Estação de Tratamento de Efluentes secundária ou terciária. Na Colômbia e Costa Rica, a população residente ligada ao sistema de coleta de esgotos é inferior a 30% e mais de 70% das águas residuárias não são tratadas (OECD, 2017). A porcentagem de população residente com ligação à rede coletora de esgoto em diferentes países é apresentada na FIGURA 8.

FIGURA 8 - SITUAÇÃO DA POPULAÇÃO RESIDENTE LIGADA À COLETA DE ESGOTOS EM DIFERENTES PAÍSES.

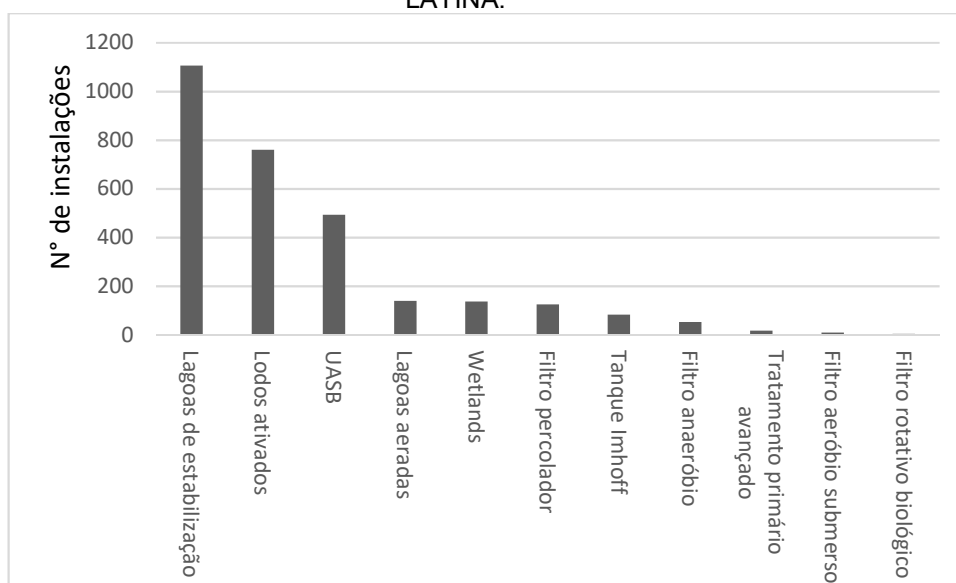


FONTE: OECD (2017)

2.6.1 América Latina e Caribe

Conforme dados apresentados por Noyola et al. (2012) as três tecnologias mais empregadas na América Latina são lagoas de estabilização (1106 instalações, 38% da amostra), seguido de lodo ativado (760, 26%) e do reator anaeróbio de manta de lodo, conhecido como UASB (493, 17%), conforme apresentado na FIGURA 9. Estas três tecnologias correspondem a 2359 instalações (80% da amostra). No entanto, as tecnologias mais representativas em termos de vazão de tratamento são lodo ativado ($104,1 \text{ m}^3/\text{s}$, 58%), seguido de lagoas de estabilização ($27,1 \text{ m}^3/\text{s}$, 15%).

FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO NA AMÉRICA LATINA.



FONTE: NOYOLA et al. (2012)

As lagoas de estabilização têm o maior número de instalações. Como são projetadas para médias e pequenas vazões, de acordo com as limitações dessa tecnologia (requisito de grandes áreas), resultam em vazões médias de $24,5 \text{ L/s}$. Por outro lado, o sistema de lodos ativados representa o tratamento de cerca de dois terços do fluxo com um quarto das instalações da amostra, com um tamanho médio de $137,0 \text{ L/s}$. O reator UASB situa-se no terceiro lugar em termos de número de instalações, com uma vazão média de $28,8 \text{ L/s}$. Essa tecnologia anaeróbia ganhou uma grande posição para o tratamento de esgoto municipal na América Latina e

Caribe em tempo relativamente curto (cerca de 20 anos), considerando que a maioria das tecnologias usadas, estão disponíveis há várias décadas.

As três tecnologias mais utilizadas tem diferenças significativas. Lagoas de estabilização e reatores UASB possuem baixo consumo de energia, resultando na redução de custos operacionais. Além disso, UASB é uma tecnologia compacta, exigindo uma pequena área por vazão de efluente, uma importante vantagem para áreas urbanas. No entanto, uma limitação do UASB é com relação à qualidade do efluente, o que faz necessário uma etapa de pós tratamento. Por outro lado, lodos ativados possui alto consumo de energia e produz um maior descarte de lodo, que deve ser tratado e gerenciado, mas é uma instalação compacta e alcança um efluente final com uma melhor qualidade, quando devidamente operado. Uma variante do processo de lodos ativados, conhecido como aeração prolongada, possui a vantagem de produzir menos lodo e este já digerido, mas com a necessidade de maior energia por metro cúbico tratado quando comparado com o processo convencional de lodos ativados (ANDREOLI et al., 2014).

2.6.2 Brasil

Os índices de cobertura em termos de coleta e tratamento de esgotos nas áreas urbanas, ainda são insatisfatórios. As redes coletoras de esgotos alcançam 61,4% da população urbana brasileira, restando 65,1 milhões de pessoas nas cidades do País que não dispõem de sistema coletivo para afastamento dos esgotos sanitários. Nem todo esgoto coletado é conduzido a uma estação de tratamento. A parcela atendida com coleta e tratamento dos esgotos representa 42,6% da população urbana total. Desse modo, 96,7 milhões de pessoas não dispõem de tratamento coletivo de esgotos (BRASIL, 2017).

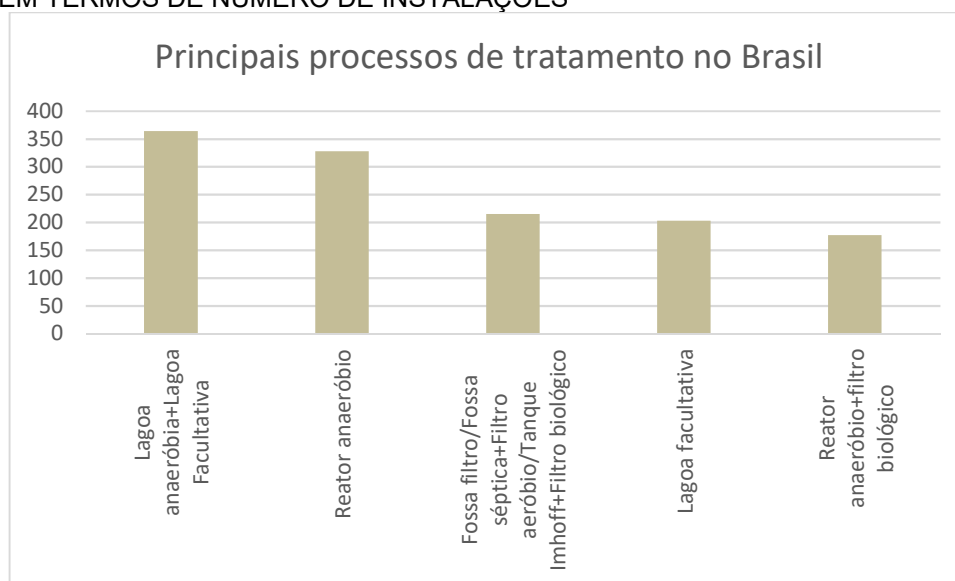
No Brasil, usualmente se projeta a implantação de uma estação de tratamento de esgotos através da expansão física do número de unidades de tratamento. Uma estação pode ter, por exemplo, dois reatores implantados em primeira etapa, e mais um reator a ser implantado em segunda etapa, após ter se verificado o crescimento da carga afluente, em virtude da expansão populacional. Esta etapalização (termo empregado por von SPERLING, 1998) é fundamental, por permitir a redução dos custos de implantação, um item crítico em nosso país. Esta alternativa de etapalização

da qualidade é seguramente muito mais desejável do que um grande descumprimento aos padrões de qualidade de efluente exigidos, de solução imprevisível no tempo. Outro aspecto relevante relacionado à etapalização da qualidade é o de possibilitar um melhor conhecimento das características qualitativas e quantitativas das águas residuárias, permitindo, dessa forma, que a evolução do sistema seja melhor definida (AISSE, 2002).

Atualmente, a grande maioria dos sistemas de tratamento de esgoto atua em nível secundário, no qual mecanismos biológicos são predominantes e cujo objetivo básico é remover matéria orgânica e, eventualmente, nutrientes como o nitrogênio e o fósforo (GUTIERREZ, 2014), predominando ETEs com eficiência de remoção de 60 a 80% (BRASIL, 2017).

No Brasil a tecnologia de UASB é a segunda mais empregada em termos de número de instalações, representando 30% das tecnologias empregadas (NOYOLA et al., 2012; BRASIL, 2017). Os reatores UASB possuem como característica a remoção da matéria orgânica afluyente e geram subprodutos utilizáveis, tais como o lodo excedente e o biogás (CHERNICHARO et al., 2012; CHERNICHARO et al., 2015). A FIGURA 10 apresenta o número de instalações dos processos de tratamento mais empregados no Brasil.

FIGURA 10 - PRINCIPAIS PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ESGOTO EMPREGADOS NO BRASIL EM TERMOS DE NÚMERO DE INSTALAÇÕES

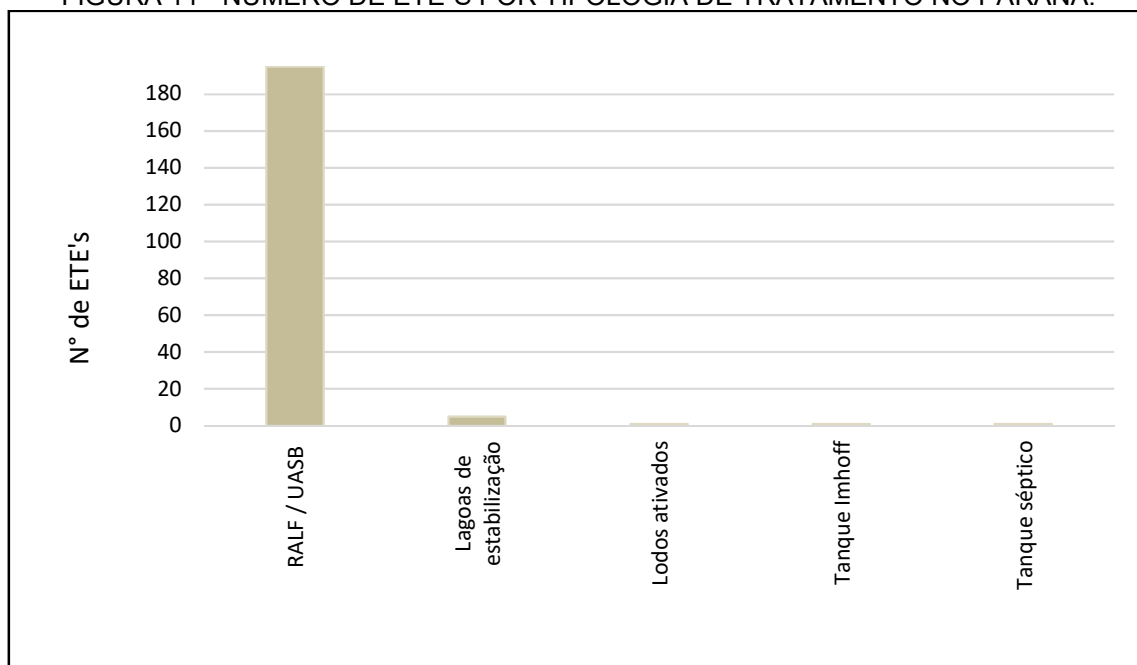


FONTE: ATLAS ESGOTOS (BRASIL, 2017).

2.6.3 Paraná

No Estado do Paraná, a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) atende um total de 143 cidades, somando 203 ETEs, com vazão total tratada de 564.189 m³/h. Destas ETEs, 94,6% utilizam reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB/RALF) e 8 (3,9%) estão operando com outra tecnologia, sendo elas: 5 ETEs (2,4%) com lagoas de estabilização, 1 (0,5%) com lodos ativados, 1 (0,5%) com Tanque Imhoff e 1 (0,5%) com tanque séptico (ROSS, 2015), conforme apresentado na FIGURA 11.

FIGURA 11 - NÚMERO DE ETE'S POR TIPOLOGIA DE TRATAMENTO NO PARANÁ.



FONTE: Adaptado de ROSS (2015).

2.7 CARACTERÍSTICAS, PRODUÇÃO E TRATAMENTO DO LODO BIOLÓGICO

Os resíduos gerados em ETEs possuem diversos pontos contribuintes, dentre eles o material gradeado, areia, espuma, lodo primário, lodo secundário e eventualmente lodo químico. No que se refere a constituição do lodo, de forma geral, possui a presença de matéria orgânica e os principais contaminantes encontrados são os metais pesados, poluentes orgânicos e microrganismos patogênicos (ROSA, 2013).

2.7.1. Características do lodo biológico

A característica do lodo biológico depende do tipo e nível de tratamento adotado. Bittencourt et al. (2011) apresentaram os resultados dos parâmetros agrônômicos dos lotes de lodo anaeróbios higienizados por EAP, aplicados em áreas agrícolas no estado do Paraná de 2011 e 2013. Os dados são apresentados na TABELA 3.

TABELA 3 - PARÂMETROS AGRONÔMICOS DOS LOTES DE LODO HIGIENIZADOS POR EAP, APLICADOS EM ÁREAS AGRÍCOLAS NO ESTADO DO PARANÁ, BRASIL, DE 2011 A 2013

Parâmetro	Unidade	ETEs Anaeróbias – RMC		ETEs Anaeróbias – Interior	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
pH_{H2O}		11,7 a	0,9	8,2 b	2,3
ST	%	50,0 b	10,6	64,8 a	13,9
SVT	(% de ST)	18,3 b	9,4	31,0 a	12,3
C org		12,0 b	8,3	16,4 a	11,0
N_{kjeldahl}		0,9 b	0,8	2,2 a	1,4
N_{amoniacal}		0,1 b	0,1	0,9 a	0,7
N_{nitrato+nitrato}		0,01 b	0,03	0,2 a	0,4
P_{total}		0,4 a	0,3	0,3 a	0,2
K_{total}		0,10 a	0,14	0,07 a	0,12
Ca_{total}		12,4 a	4,1	10,3 a	11,7
Mg_{total}		7,0 a	2,5	2,2 b	3,5
S_{total}		1,0 a	1,0	0,7 a	1,4
Na_{total}		0,1 a	0,1	0,3 a	1,2

FONTE: BITTENCOURT (2014).

NOTA: As médias seguidas pela mesma letra, na mesma linha, não diferem estatisticamente entre si. ST: sólidos totais, SVT: sólidos voláteis totais, Corg: carbono orgânico, N: nitrogênio, P: fósforo, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, S: enxofre, Na: sódio. Os parâmetros P, K, Ca, Mg, S, Corg, SVT são apresentados em teores totais.

Observa-se na TABELA 3, que os lotes das UGLs do interior apresentaram médias de SVT, Corg, N_{kjeldahl}, N_{amoniacal}, Nitrato e Nitrito mais elevadas que as das UGLs da RMC. Segundo os autores, a maior média de N_{amoniacal} dos lotes do interior pode estar relacionada à menor média de pH e consequente menor perda por volatilização do N_{amoniacal}. Enquanto as maiores médias de Nitrito e Nitrato, devido à oxidação do N_{amoniacal}, podem estar relacionadas ao maior período de tempo que os lotes do interior permaneceram armazenados em pátio. Bittencourt (2014) apresentou as médias dos parâmetros inorgânicos (metais) dos lotes de lodo

anaeróbios que apresentaram teores acima do limite de quantificação laboratorial, destinados a uso agrícola no Paraná, no período de 2011 a 2013 (TABELA 4).

TABELA 4 - PARÂMETROS INORGÂNICOS DOS LOTES DE LODO ANAERÓBIOS DO ESTADO DO PARANÁ NO PERÍODO DE 2011 A 2013

Metal	Média (mg kg ⁻¹ ST)		n° de lotes		CV (%)		Total	
	RMC	Interior	RMC	Interior	RMC	Interior	Média (mg kg ⁻¹ ST)	CV (%)
As	6,8 a	26,1 a	13	3	175,7	-	10,4	173,3
Ba	153,5 b	322,8 a	42	52	44,1	85,6	247,3	86,1
Cd	0,59 b	8,7 a	20	45	118,4	75,9	6,2	90,2
Cr	26,4 b	48,6 a	46	52	60,4	118,6	38,2	114,8
Cu	69,3 b	180,5 a	47	53	35,1	90,5	128,4	94,6
Hg	2,9 a	0,02 a	39	2	140,3	-	2,8	140,1
Mo	4,04 a	7,03 a	28	22	77,6	120,2	5,4	115,8
Ni	16,4 b	49,9 a	47	53	55,7	61,0	34,1	68,1
Pb	20,2 b	84,7 a	47	52	56,8	72,7	54,1	84,7
Se	11,0 a	5,2 a	6	4	55,2	61,7	8,7	66,0
Zn	392,1 a	445,4 a	47	53	46,5	53,3	420,7	51,3

FONTE: BITTENCOURT (2014).

NOTA: As médias seguidas pela mesma letra, na mesma linha, não diferem estatisticamente entre si. As: Arsênio, Ba: Bário, Cd: Cádmio, Cr: Cromo, Cu: Cobre, Hg: Mercúrio, Mo: Molibdênio, Ni: Níquel, Pb: Chumbo, Se: Selênio, Zn: Zinco.

2.7.2 Produção do lodo biológico

Os sistemas que geram as menores quantidades de lodos são as lagoas de estabilização e os reatores UASB. As maiores quantidades são representadas pelos sistemas de lodos ativados de aeração convencional. Este fato ocorre, pois nas lagoas e reatores UASB o lodo sofre digestão e adensamento, consequentemente redução de volume ao contrário do que acontece no sistema de lodos ativados de aeração convencional, onde a idade do lodo é baixa. O intervalo de remoção do lodo também varia de acordo com o sistema de tratamento. Enquanto nos sistemas de lagoas a remoção do lodo biológico é em intervalo de anos, nos sistemas de UASB + Pós os intervalos são em semanas e nos sistemas de lodos ativados a remoção é contínua (ANDREOLI et al., 2014).

A quantidade de lodo a ser tratado em cada sistema de tratamento é apresentada na TABELA 5.

TABELA 5 - QUANTIDADE DE LODO A SER TRATADO EM DIFERENTES SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

Sistema	kgSST/DQO aplicada	Volume de lodo (L/hab.d)
Lodo ativado convencional	0,60-0,80	3,1-8,2
Lodo ativado aeração prolongada	0,50-0,55	1,4-5,2
Reator UASB	0,12-0,18	0,2-0,6
Reator UASB + Pós tratamento aeróbio	0,20-0,32	0,5-1,1

FONTE: Adaptada de ANDREOLI et al. (2014).

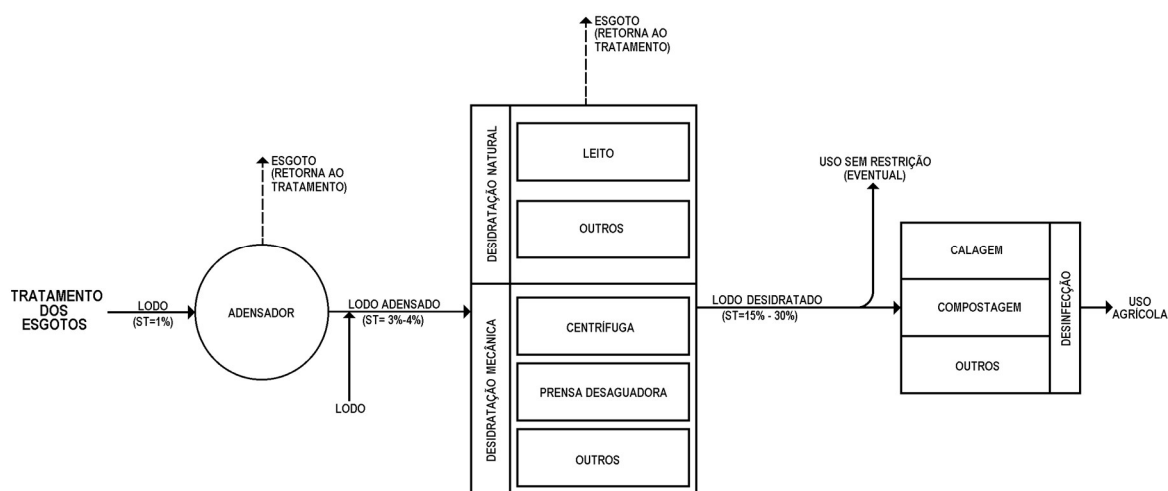
Como o lodo dos sistemas reator UASB + Pós tratamento já apresenta-se como estabilizado, não há a necessidade da etapa de digestão. No estado do Paraná a geração total de lodo de esgoto no período de 2011 a 2013 foi de 1.437.309 m³ (com cerca de 4% ST) (BITTENCOURT, 2014).

Com relação ao volume a ser disposto de lodo biológico, o valor diminui na integração do sistema UASB + Lodo ativado. Van Haandel (1993) cita valores entre 0,10 a 0,25 L lodo/hab.dia para a tecnologia de aeração prolongada e de 0,05 a 0,15 L lodo/hab.dia para a integração dos dois sistemas. Von Sperling (2014) cita valores entre 0,10 e 0,28 L lodo/hab.dia para a tecnologia de aeração prolongada e de 0,04 e 0,16 L lodo/hab.dia para a integração.

2.7.3 Tratamento e gerenciamento do lodo biológico

As principais etapas que envolvem o tratamento e gerenciamento do lodo biológico são: adensamento, desaguamento, desinfecção e destinação final, conforme demonstrado na FIGURA 12 (simplificada) e FIGURA 13 (detalhada).

FIGURA 12 - PROCESSAMENTO DO LODO DE ESGOTO EM UMA ETE ANAERÓBIA



FONTE: AISSE (2000).

2.7.3.1 Desaguamento e secagem

A primeira etapa para o gerenciamento do lodo digerido (estabilizado) é o desaguamento. As principais razões para se realizar o desaguamento são: redução do custo de transporte para o local de disposição final; melhoria nas condições de manejo do lodo; aumento do poder calorífico do lodo, através da redução da umidade com vistas à preparação para incineração; redução do volume para disposição em aterro sanitário ou reuso na agricultura e diminuição da produção de lixiviados quando da sua disposição em aterros sanitários (ANDREOLI et al., 2014). A TABELA 6 demonstra as principais características, vantagens e desvantagens dos principais processos de desaguamento de lodos, naturais e mecanizados.

FIGURA 13 - PROCESSAMENTO DETALHADO DO LODO DE ESGOTO EM UMA ETE

(continua)

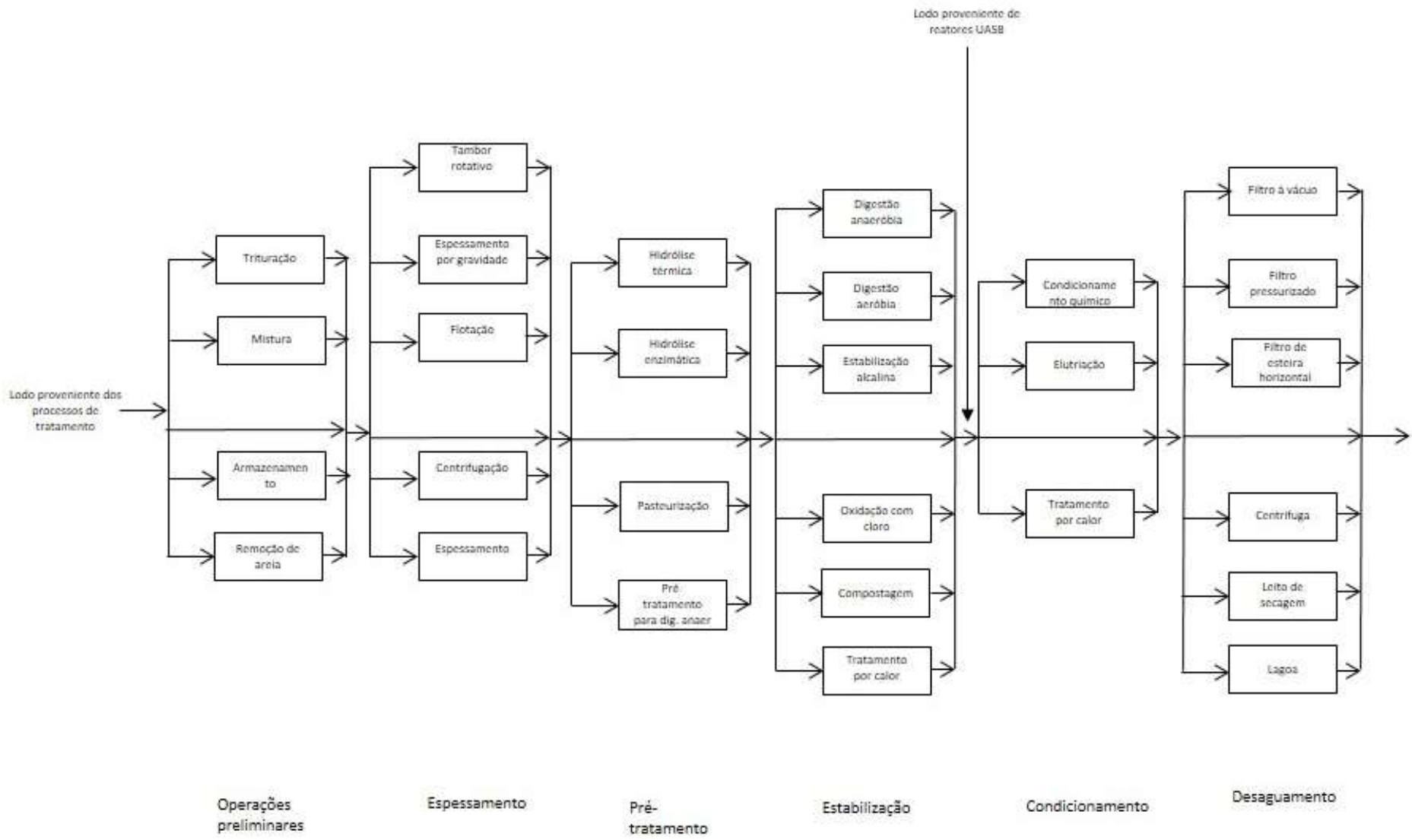
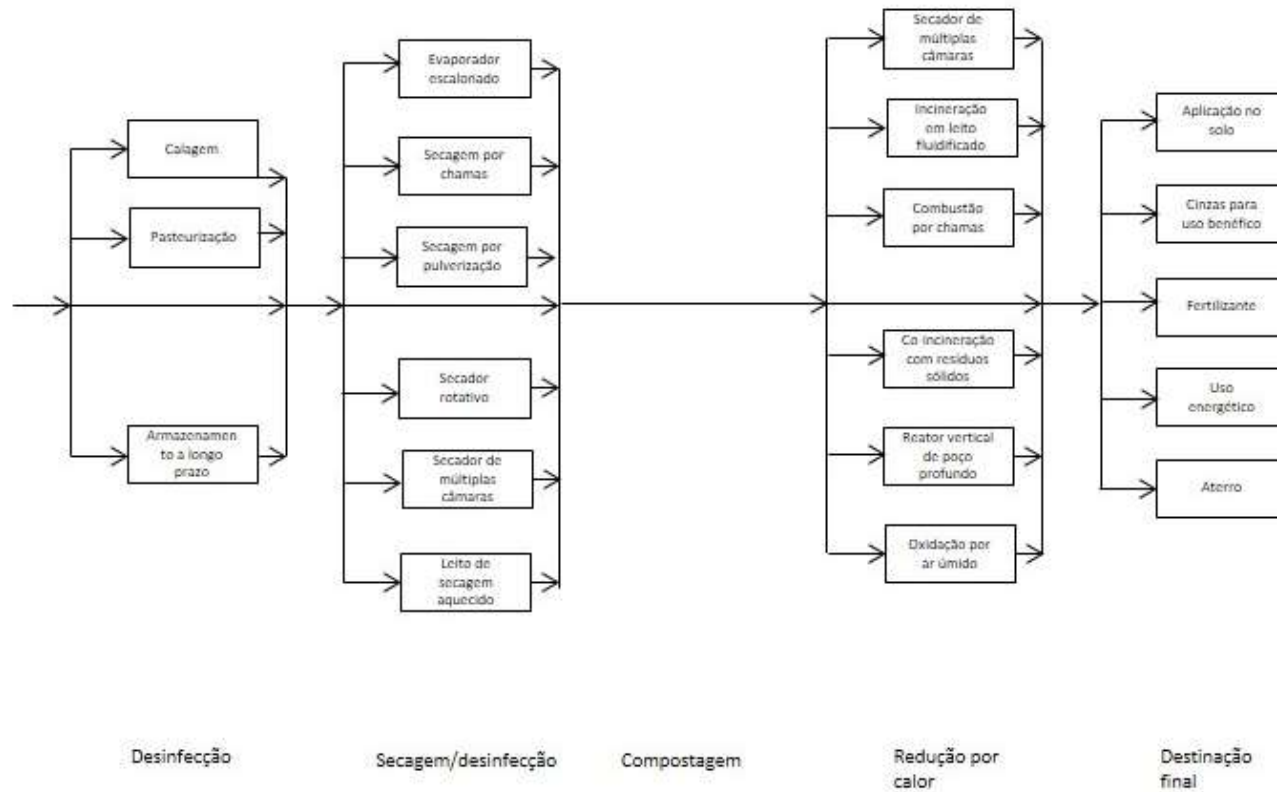


FIGURA 13 - PROCESSAMENTO DETALHADO DO LODO DE ESGOTO EM UMA ETE

(conclusão)



FONTE: Adaptado de AISSE et al.(1999) *apud* METCALF & EDDY (1991)

TABELA 6 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS, VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PROCESSOS DE DESAGUAMENTO DE LODOS

Características	Processos Naturais			Processos mecanizados		
	Leitos de secagem	Lagoas de lodos	Centrífugas	Filtros a vácuo	Prensas desaguadoras	Filtros prensa
Demanda de área	+++	+++	+	++	+	+
Demanda de energia	-	-	++	+++	++	+++
Custo de implantação	+	+	+++	++	++	++
Complexidade operacional	+	+	++	++	++	+++
Demanda de manutenção	+	+	++	++	+++	+++
Complexidade de instalação	+	+	++	++	++	++
Influência do clima	+++	+++	+	+	+	+
Sensibilidade à qualidade do lodo	+	+	+++	++	++	++
Produtos químicos	+	-	+++	+++	+++	+++
Complexidade de remoção do lodo	++	+++	+	+	+	+
Teor de ST na torta	+++	++	++	+	++	+++
Odores e vetores	++	+++	+	+	+	+
Ruídos e vibração	-	-	+++	++	++	++
Contaminação do lençol freático	++	+++	+	+	+	+

FONTE: Adaptada de ANDREOLI et al. (2014).

A centrífuga é mais utilizada no desaguamento em ETEs de médio e grande porte. Da mesma forma que nos outros sistemas de desidratação mecanizada, requer um pré-condicionamento do lodo, geralmente aplicando polieletrólitos catiônicos, que melhoram a clarificação e as características do escoamento na fase sólida, além de promover a floculação (JORDÃO; PESSÔA, 2014). Em um estudo realizado com lodo de ETA, os valores obtidos após a centrifugação foram de 14% de teores de Sólidos Totais, na torta de lodo de ambas as estações avaliadas, mas são esperados teores de 30% em processos de desaguamento mecânico através de centrifugação (OLIVEIRA, AISSE, 2013).

Outro método utilizado para a remoção da umidade de lodos de esgotos é a secagem térmica (ANDREOLI et al., 2014). Neste método, o calor proveniente do

biogás pode ser utilizado. Existem, no mercado, vários equipamentos disponíveis para secagem térmica de lodo de ETE. Esses equipamentos são classificados, principalmente, de acordo com a forma de transferência de calor, que pode ser: direta, indireta, radiante e mista. Nos secadores diretos, o ar quente entra em contato direto com o lodo e a transferência de calor se dá por convecção. Nos indiretos, a transferência de calor ocorre por meio do contato do lodo com superfícies aquecidas por: ar quente, vapor ou óleo térmico; e a troca de calor é realizada por condução (BRASIL, 2015).

2.7.3.2. Higienização

Um dos constituintes mais preocupantes do lodo de esgoto são os microrganismos patogênicos. Bactérias, vírus, protozoários, parasitas intestinais e seus ovos estão presentes nos lodos de esgotos e uma significativa parte deles são causadores de doenças. Os níveis de patogenicidade do lodo podem ser substancialmente reduzidos através dos processos de estabilização e tratamento, como a digestão anaeróbia ou aeróbia. Entretanto, muitos parasitas intestinais e principalmente seus ovos, são muito pouco afetados por processos de digestão convencional, necessitando uma etapa complementar ou conjugada aos processos convencionais para sua completa inativação, denominada de higienização. O objetivo de se introduzir um processo de higienização de lodos na estação de tratamento de esgotos é de garantir um nível de patogenicidade no lodo que, ao ser disposto no solo, não venha a causar riscos à saúde da população, aos trabalhadores que vão manuseá-lo e impactos negativos ao meio ambiente (ANDREOLI et al., 2014).

A maioria dos países que possuem alguma normativa quanto aos aspectos sanitários da disposição agrícola do lodo relacionam uma série de tecnologias de processamento para adequação do lodo aos níveis de bactérias, enterovírus e ovos viáveis de helmintos previstos para disposição. Os processos citados pela CONAMA 375/2006 e por Andreoli et al. (2014) são: compostagem, digestão aeróbia autotérmica, caleação ou estabilização alcalina, pasteurização e secagem térmica. Outros processos, tais como incineração e a oxidação úmida, são mais complexos operacionalmente e requerem maiores investimentos para implantação.

2.7.3.2.1. Estabilização Alcalina Prolongada - EAP

A Estabilização Alcalina é utilizada para se tratar lodos primários, secundários ou digeridos. O processo ocorre quando suficientemente quantidade de material alcalino, geralmente cal, é adicionada ao lodo para aumentar o pH até 12, resultando em uma redução da população de microrganismos e da potencial ocorrência de odores (METCALF & EDDY 2016). A cal virgem (CaO) e a cal hidratada (Ca(OH)_2) são os produtos mais utilizados. A cal virgem é o produto mais indicado quando aplicado em lodos já na fase sólida. Estudos mostram que dosagens de CaO entre 30% a 50% da massa seca de lodo são capazes de alcançar as características necessárias para a produção de biossólidos. O lodo após misturado deve permanecer em local coberto por um período de 30 dias para que complete a higienização (FIGURA 14) (ANDREOLI et al. 2014; PARANÁ, 2009). A FIGURA 15 demonstra os componentes do sistema necessários para a realização da EAP do lodo.

FIGURA 14 - ARMAZENAMENTO DO LODO EM LOCAL COBERTO PARA COMPLETA HIGIENIZAÇÃO



a) Vista aérea do barracão de armazenamento do lodo, do sistema para higienização (silo de cal e misturador) e adensador.

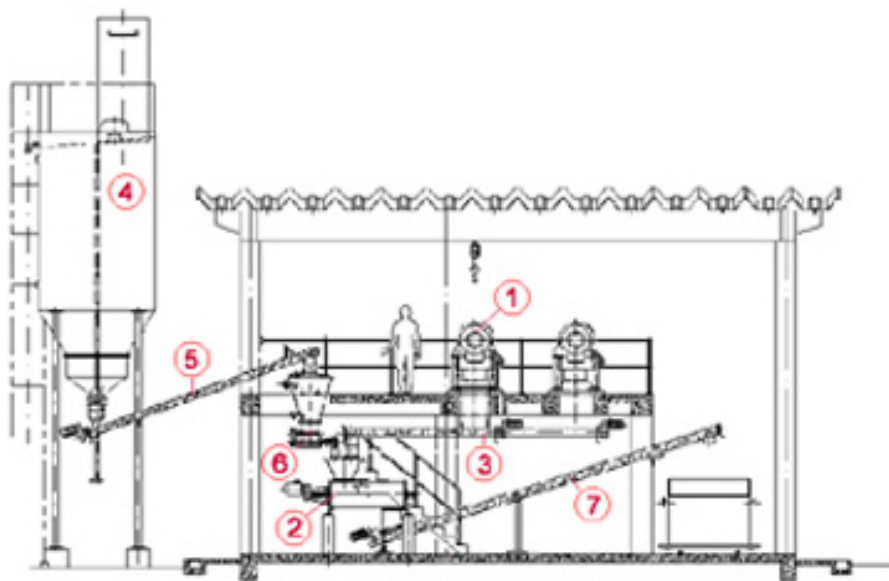


b) Vista interna do barracão de armazenamento de lodo.



c) Armazenamento de lodo caleado dentro do barracão.

FIGURA 15 - ESTABILIZAÇÃO ALCALINA DE LODO: COMPONENTES DO SISTEMA



FONTE: PIERALISI¹

Legenda: 1. Decanter centrífugo; 2. Misturador; 3. Rosca transportadora de torta desidratada; 4. Silo de armazenamento de cal virgem; 5. Rosca transportadora de cal virgem; 6. Dosador volumétrico de cal; 7. Rosca transportadora de torta estabilizada.

A principal desvantagem da utilização desse processo (EAP) é o aumento dos custos operacionais e na maior geração de lodo, que inclui a massa de produto químico adicionado, o que aumenta o problema quanto ao destino da massa final de lodo (JORDÃO; PESSÔA, 2014). Outra desvantagem associada ao processo é a liberação de fortes odores do lodo, causado pela volatilização da amônia pela elevação do pH. Este odor é mais acentuado em lodos digeridos anaerobicamente devido à alta concentração de amônia gerada neste processo.

Gutierrez (2014), observou que o uso da cal virgem no processo de higienização do lodo é bem mais impactante que o calcário. Esta diferença é explicada, fundamentalmente, pelo consumo energético relacionado à produção dos materiais, sendo o calcário menos exigente energeticamente em comparação à cal virgem. Assim, apesar dos ganhos ambientais relacionados ao uso do lodo caleado como biofertilizante e/ou condicionador de solo, este resultado sinaliza que outras formas de higienização do lodo para uso agrícola devem ser investigadas em trabalhos futuros, de modo a potencializar os ganhos atribuídos do uso do lodo na agricultura.

¹ Comunicação pessoal

2.7.3.2.2 Secagem térmica

MetCalf e Eddy (1991) citam uma série de tecnologias disponíveis de secagem térmica, classificados quanto à forma de transferência de calor ao lodo. Os equipamentos podem funcionar por condução, convecção, irradiação ou a combinação de dois ou mais métodos.

O processo de secagem térmica é uma das mais eficientes e flexíveis formas de redução do teor de umidade de “tortas” oriundas do desaguamento de lodos orgânicos domésticos e industriais disponíveis atualmente. É recomendável um teor de sólidos na alimentação entre 15-30%, obtido por meio do desaguamento mecânico. O processo consiste no aquecimento do lodo em ambiente hermeticamente fechado, com a consequente evaporação e coleta da umidade presente. A exclusão da etapa de estabilização biológica reduz de forma significativa o custo de implantação, além de proporcionar a produção de material com maior teor de matéria orgânica e poder calorífico. O biogás dos reatores UASBs pode ser utilizado como fonte de energia para realizar a secagem do lodo. Em condições ideais são necessários 2.744 kJ (655 kcal) para evaporar 1 kg de água presente no lodo (ANDREOLI et al., 2014). O Guia Técnico de Aproveitamento do Biogás cita valores entre 3.352,01 e 4.190,01 kJ (DAVID, 2002 *apud* BRASIL, 2015). Possetti et al. (2015) verificaram, em um experimento piloto, que a energia necessária para remover 1 kg de água presente no lodo foi, em média, de 5.543,39 kJ.

A secagem térmica permite a obtenção de teores de sólidos da ordem de 90%, tornando o lodo com consistência de grânulos ou pó, sendo, portanto, um processo de remoção de umidade que obtém resultados bastante superiores aos demais em termos de concentração de sólidos. O lodo sai do secador em forma de “pellets” com diâmetro médio entre 2 a 5 mm (ANDREOLI et al., 2014). Na NBR 12.209 (ABNT, 2011) recomenda-se que, para projeto, o teor de sólidos na torta proveniente de Secagem Térmica seja considerado na faixa de 60 a 90%.

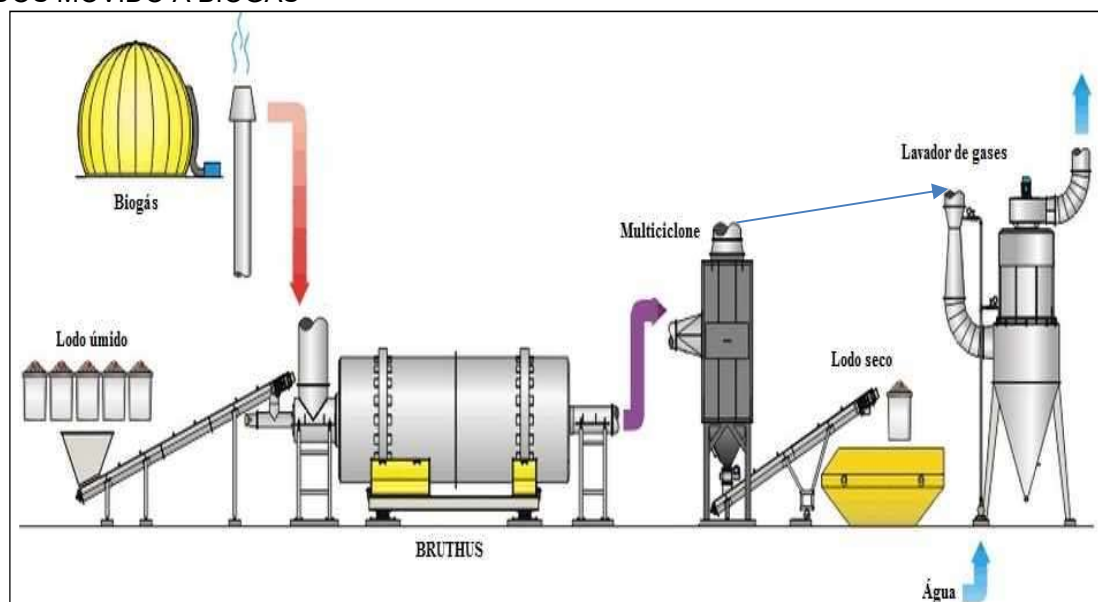
O processo de Secagem Térmica é apresentado não só no âmbito da remoção de umidade, mas também como uma alternativa de estabilização e higienização, uma vez que, além de volatilizar boa parte da matéria orgânica, promove a inativação de organismos patogênicos, transformando o lodo em produto de valor agregado. Segundo MetCalf & Eddy (1991), a secagem térmica possui, dentre outras, as vantagens de produzir um lodo compatível à Classe A (na classificação americana da

EPA – *Environmental Protection Agency*), podendo este lodo ser utilizado até mesmo em gramados e jardins de casas.

Deve-se destacar que a secagem térmica possui desvantagens, ou contrapontos, como alto custo de investimento inicial, relativa complexidade operacional e alto consumo de combustível. Entretanto, pesquisas têm sido realizadas quanto à utilização do lodo como fonte alternativa de combustível, por possuir elevado poder calorífico, aproveitado como combustível em caldeiras, aquecedores industriais, fornos de cimentos, etc.

Possetti et al (2015) obtiveram lodo com 84 % de sólidos totais em um secador térmico piloto, utilizando biogás de reatores UASB como fonte de combustível. Além disso, os autores obtiveram, a partir de análises microbiológicas do lodo, resultados de remoção dos indicadores biológicos: Ovos Viáveis de Helminths, Salmonella, Vírus Entéricos e Coliformes Termotolerantes. Os resultados demonstraram remoções suficientes para classificar o lodo como Classe A, segundo a Resolução CONAMA 375/06, sem a adição de produtos químicos, viabilizando o lodo a ser disposto na agricultura (FIGURA 16).

FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA TÉRMICO PILOTO DE SECAGEM DE LODOS MOVIDO A BIOGÁS



FONTE: POSSETTI et al. (2015).

2.7.3.3 Tratamento térmico

O lodo de esgoto desaguado gerado nas ETEs pode ser considerado como uma forma de biomassa, em virtude da fração orgânica e de seu elevado poder calorífico. Apesar da elevada umidade, a conversão do lodo através de processos termoquímicos pode garantir a autossuficiência energética dos processos de conversão, a exemplo da pirólise, gaseificação e combustão (MANARA; ZABANIOTOU, 2012). Tem-se como principal meta das conversões energéticas a redução da matéria orgânica a CO_2 e H_2O .

Muitos autores têm estudado alternativas de tratamento e disposição de lodo de ETEs, embora não se observe um posicionamento claro sobre o método mais adequado para tal. As propostas convergem para o posicionamento de que a recuperação energética do subproduto irá predominar sobre o uso agrícola e disposição em aterros sanitários (ROSA, 2013).

2.7.3.3.1 Pirólise

Assim como a gaseificação, a pirólise requer o preparo do lodo para o processo térmico. A pirólise é uma alternativa que apresenta flexibilidade no uso dos subprodutos líquidos, sólidos e gasosos, interna e externamente à ETE, assim como o menor potencial de geração de poluentes tóxicos. Esta tecnologia está em crescente desenvolvimento e aplicação prática para fins de aproveitamento energético do lodo (ROSA, 2013).

2.7.3.3.2. Gaseificação

A gaseificação e a pirólise do lodo apresentam geralmente maior eficiência que o processo de combustão, além de permitir a cogeração de calor e eletricidade. Os gastos operacionais destes processos são semelhantes, sendo que a principal diferença entre estes é a valoração dos subprodutos e os impactos ambientais. Pelo fato da gaseificação produzir um gás com baixo grau de contaminação, o torna mais atrativo que a pirólise para instalação na própria ETE (MANARA; ZABANIOTOU, 2012).

2.7.3.3.3. Combustão

No que se referem os parâmetros operacionais convencionais, o processo da combustão é mais difundido e consolidado, apresentando maior simplicidade operacional, menores exigências de preparo do lodo, e aplicabilidade a ETEs de diferentes portes. Entretanto, o controle ambiental das unidades que promovem a combustão do lodo deve ser rigoroso, em função do potencial de geração de poluentes, tais como a dioxina e furanos policlorados, SO_x, NO_x e metais pesados (ROSA, 2013).

As soluções que integram o uso conjunto do lodo e do biogás como fontes e energia para combustão relacionam-se com o aproveitamento do calor gerado na combustão do biogás, através de motores de combustão interna e caldeiras e para a manutenção da temperatura dos digestores anaeróbios de lodo (ROSA, 2013).

Com relação às cinzas geradas no processo de combustão do lodo, o processo degrada quase completamente os poluentes orgânicos e quase quantitativamente transfere carbono e nitrogênio para as suas formas gasosas. Entretanto outros componentes são concentrados nas cinzas, como o fósforo, silício e a maior parte dos metais (KRUGER, ADAM, 2015; CIÉSLIK et al., 2015). Podendo as cinzas de lodo de esgoto serem utilizadas como substituto do fósforo. Entretanto análises realizadas com as cinzas de lodo de esgoto alemão mostraram concentrações de mercúrio acima do estipulado (VOGEL, et al. 2016).

Das 24 indústrias de incineração do lodo estudadas na Alemanha, 66% destinam as cinzas para preenchimento de mina (37%) e em aterro (29%). A minoria (5%) utiliza as cinzas como fertilizante. Um tratamento adicional das cinzas é necessário para a diminuição dos metais pesados nas cinzas e aumento da biodisponibilidade do fósforo. Na Alemanha, as cinzas de lodo de esgoto para uso na agricultura, devem atender os limites estipulados pelo governo alemão e devem possuir alta biodisponibilidade de fósforo, como o superfosfato triplo. A biodisponibilidade do fósforo pode ser estimada pela solubilidade do fósforo em citrato neutro de amônio (P_{nac}). A média de P_{nac} solubilidade das cinzas de lodo de esgoto na Alemanha é muito baixa (31% do total), indicando que as cinzas não são adequadas como fertilizante e necessitam de tratamento prévio (KRUGER, ADAM, 2015). Autores estão estudando alternativas para tratamento das cinzas e a recuperação do fósforo

(LIU, QU, 2016). Atualmente, 80% do fósforo extraído das rochas é utilizado para a fabricação de adubos.

2.7.4 Destino final

2.7.4.1 Aterro Sanitário/Industrial

Atualmente é a alternativa mais empregada para o gerenciamento do lodo de ETE, no Brasil. Nesse contexto, destacam-se os elevados gastos no transporte, a taxa para a disposição em aterro e o desperdício do potencial dos nutrientes e/ou energético do lodo desidratado. Com o intuito de controlar os passivos ambientais envolvidos na disposição de lodo de ETE em aterro sanitário, alguns países se adiantam em medidas mais restritivas e que normatizam sobre as condições físicas do material a ser disposto. Na União Europeia o envio de lodo para aterros sanitários foi refutado devido às diretrizes de gerenciamento de resíduos e ao elevado custo. Na Alemanha, o lodo deve ter no mínimo 35% de sólidos e um reduzido teor de orgânico, o que condiciona a disposição apenas das cinzas produzidas na incineração do lodo (ROSA, 2013).

2.7.4.2 Uso agrícola

O uso ou disposição final do lodo biológico inicia-se com o próprio sistema de tratamento de esgotos. O tipo ou intensidade do tratamento de esgoto reflete-se sobre o tipo, a quantidade e a qualidade do lodo gerado (ANDREOLI et al., 2014).

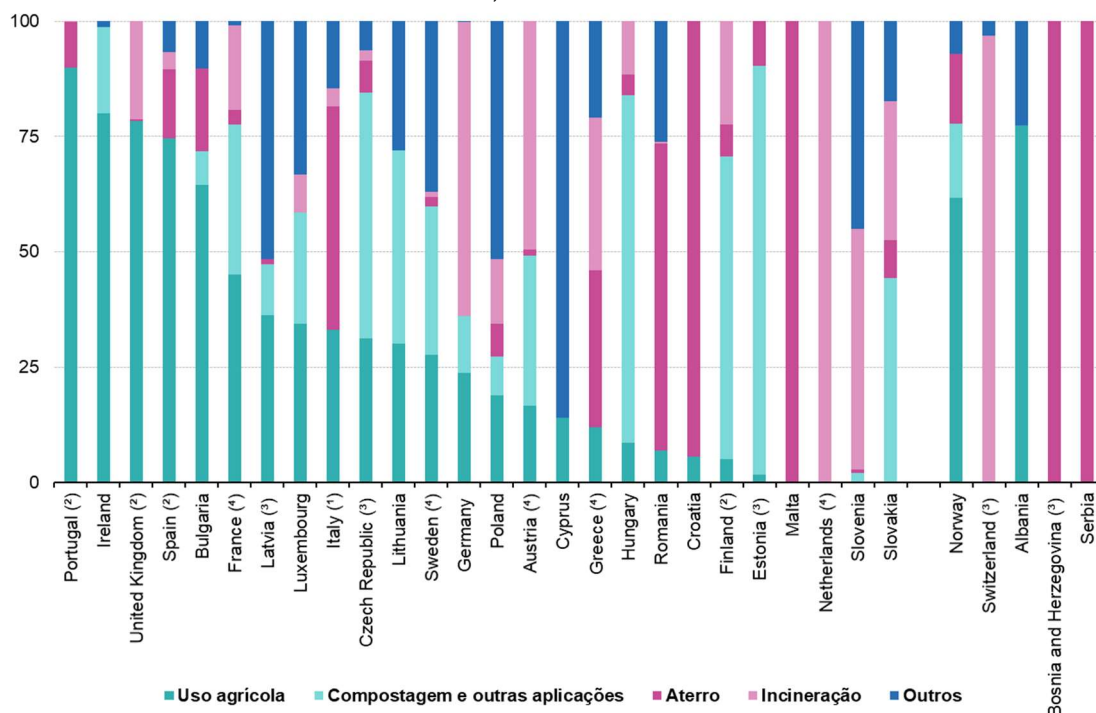
Em vários países do mundo o uso agrícola, em diferentes proporções, é uma das alternativas de destinação final para o lodo de esgoto gerado nas ETEs. Internacionalmente, o termo biossólido é utilizado para distinguir o lodo de esgoto processado. Segundo Beecher et al. (2007) as definições de biossólidos geralmente aceitas referem-se a usos agrícolas ou aplicações no solo. A USEPA (1994) define biossólido como um produto sólido essencialmente orgânico, produzido por processos de tratamento de esgoto, que pode ser benéficamente reciclado (BITTENCOURT, 2014).

Nos Estados Unidos, as cerca de 16.500 estações municipais de tratamento de esgoto produzem aproximadamente oito milhões de toneladas secas de lodo a cada ano. Tradicionalmente, as opções para destinação do lodo de esgoto têm sido a incineração (17%), aterro (28%) ou a aplicação em solos para produção agrícola, florestal e recuperação de áreas (45%). A ETE de Chicago, maior produtora de lodo de esgoto do país com cerca de 160 mil toneladas secas por ano, o destina para aplicação no solo de duas formas. Na primeira delas, o lodo é utilizado em áreas agrícolas para produção de culturas, como milho e soja. A outra é um programa local onde o lodo higienizado é usado na área metropolitana de Chicago como fertilizante em áreas de lazer, como campos de golfe, parques e escolas de ensino médio. Para isso, são desenvolvidas atividades para minimizar as percepções negativas do uso do produto e para divulgar o uso do bio sólido e atrair novos usuários (GODWIN, 2012).

Na Austrália, o uso agrícola representa 75% do destino final, sofrendo um aumento significativo nos últimos anos: 55% em 2010, 59% em 2013 e 64% em 2015 (AUSTRÁLIA, 2018).

Na União Européia, países como Portugal, Irlanda, Reino Unido, Espanha e Bulgária possuem destinação agrícola, representando mais de 50% do destino final total (FIGURA 17).

FIGURA 17 - PORCENTAGEM DO DESTINO FINAL DE LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS, 2015.



Nota: Bélgica e Dinamarca: não disponível.

(1) 2010 (2) 2012 (3) 2013 (4) 2014

FONTE: EUROSTAT (2018)

No Brasil, a Resolução Conama 375/06 regulamenta o uso agrícola do lodo de esgoto (BRASIL, 2006). O regulamento norte americano foi tomado como base para a elaboração da maior parte dos critérios e procedimentos dessa Resolução (BITTENCOURT, 2014).

No estado do Paraná, a Resolução Sema 021/09 (PARANÁ, 2009) contém os procedimentos, padrões e requisitos para a utilização do lodo em áreas agrícolas definidos na Resolução Conama 375/06, sendo em alguns aspectos mais restritiva que a resolução federal. No Paraná, tanto as normas anteriores, Instrução Técnica do IAPCEP/DTA 01/2002 (PARANÁ, 2002) e Resolução Sema 01/07 (PARANÁ, 2007), quanto à norma atual, Resolução Sema 021/09, não permitem a existência de lodo equivalente a Classe B (BRASIL, 2006), bem como, possuem limites menores de concentração máxima permitida no lodo de esgoto para Cd, Cu, Hg, Ni e Zn, quando comparados aos da Resolução Conama 375/06 (BRASIL, 2006). A Resolução Sema 021/09 define UGL como uma unidade vinculada ou não a uma ETE que realiza o gerenciamento de lodo gerado por uma ou mais ETEs, para fins de reciclagem

agrícola. O documento considera que o lodo somente pode ser aplicado na agricultura caso satisfaça pré-requisitos que tornem seu uso seguro (PARANÁ, 2009; BITTENCOURT, 2014)

Entre os anos de 2007 e 2013, a SANEPAR destinou 162.825 toneladas de lodo desaguado higienizado (ST = 39,72%) para aplicação agrícola, gerados na RMC (FIGURA 18). Deste total 40.227 toneladas provenientes de reatores UASB (TS = 48,87%) para a aplicação agrícola. A área aplicada total foi de 4.510 ha (BITTENCOURT, 2014). No estado do Paraná, no período de 2011 a 2013, foram aplicados 107.416 t de lodo de esgoto higienizadas por Estabilização Alcalina Prolongada, com teor médio de 53,7% ST, em 5.529 ha de áreas agrícolas do estado.

FIGURA 18 - APLICAÇÃO DO LODO DE ESGOTO EM ÁREA AGRÍCOLA



a) Descarregamento de caminhão.



b) Espalhamento do lodo (Lancer).

FONTE: BITTENCOURT (2014).

Em um estudo de caso descrito por Bittencourt et al. (2011), verificaram uma distância média das UGL's às áreas agrícolas de 65 km.

De acordo com a autora, ao realizar o cálculo de determinação da taxa de aplicação de lodo para as áreas agrícolas no período, o critério de acúmulo de substâncias inorgânicas no solo não foi o fator limitante em nenhuma das recomendações agronômicas elaboradas.

2.8 TRATAMENTO E DESTINO FINAL DO BIOGÁS

2.8.1 Caracterização e produção do biogás

O biogás oriundo de reatores tipo UASB é composto majoritariamente por metano (60 a 85% v/v), nitrogênio (10 a 25% v/v) e gás carbônico (5 a 15% v/v). Em

menor volume, o biogás ainda apresenta pequenas quantidades de hidrogênio, gás sulfídrico, amônia e outros gases traço (AZEVEDO NETTO, 1977; NOYOLA et al., 2006; RIETOW, 2014; LOBATO, 2011; BRASIL, 2015). A TABELA 7 apresenta os componentes usualmente encontrados no biogás produzido em reatores UASB tratando esgotos domésticos.

TABELA 7 - COMPOSIÇÃO VOLUMÉTRICA TÍPICA DO BIOGÁS GERADO EM REATORES UASB

Parâmetro	Unidade	Composição volumétrica típica
Metano – CH₄	%	60 a 85
Gás carbônico – CO₂	%	5 a 15
Monóxido de carbono – CO	%	0,3
Nitrogênio – N₂	%	10 a 25
Hidrogênio – H₂	%	0 a 3
Sulfeto de hidrogênio – H₂S	ppmv	1000 a 2000
Oxigênio – O₂	%	Traços

FONTE: Adaptado de LOBATO (2011).

A Resolução SEMA 16/2014 cita no seu artigo 58 que “O biogás gerado em reatores de digestão anaeróbia deve ser aproveitado e na impossibilidade de seu aproveitamento será necessária sua queima, através da instalação e operação contínua de queimadores para conversão do metano” (PARANÁ, 2014).

Atendendo a Resolução, usualmente, nas estações de tratamento de esgoto do Brasil, o biogás gerado no processo de tratamento do esgoto doméstico é captado e conduzido para queima em *flares* abertos (FIGURA 19) (equipamentos que promovem a destruição dos elementos componentes do biogás através do processo de combustão). Os queimadores abertos possuem eficiência de 50%. Nos queimadores fechados, em experimento piloto na SANEPAR, a eficiência foi de até 98% de remoção de CH₄ e de 95% de H₂S (KAMINSKI, 2017). Ambos os valores foram obtidos teoricamente a partir da temperatura e do tempo de detenção dos gases na câmara de combustão, aplicando-se o descrito por Lewandowski (2000), citado por Kaminski (2017).

FIGURA 19 - TIPOS DE QUEIMADORES PARA BIOGÁS



a) Queimador aberto

b) Queimador enclausurado

FONTE: KAMINSKI (2017).

2.8.1.1 O gás metano

O gás metano se origina de fontes biogênicas e não biogênicas. As emissões não biogênicas incluem: mineração, queima de combustíveis fósseis (gás natural, petróleo e carvão) e fontes geológicas (CH_4 fóssil da infiltração do gás natural nas bacias sedimentares e geotérmicas/ CH_4 vulcânico). Entretanto as emissões biogênicas representam 70% das emissões totais. Estas fontes incluem: queima de biomassa, pântanos, cultura de arroz, pecuária, florestas e oceanos. A emissão de metano destas fontes envolve uma sequência de processos: começa com a fermentação primária de orgânicos complexos para ácidos orgânicos, seguido pela fermentação dos álcoois secundários ao acetato, H_2 e CO_2 , que são convertidos a CH_4 pelas arqueas metanogênese (metanogênese) (DENMAN et al., 2007).



A taxa de emissão do metano geralmente é estimada. Uma limitação é a medição dos isótopos do CH_4 (^{13}C), que trazem uma incerteza com relação à quantidade e fontes (DENMAN et al., 2007).

O metano pode ser recuperado (de 28 à 75%) e transformado em energia. De acordo com Metcalf & Eddy (2016), no tratamento anaeróbio de esgoto doméstico em reator UASB e na digestão anaeróbia de lodo aeróbio estima-se uma produção de biogás de $0,4 \text{ Nm}^3\text{CH}_4.\text{kgDQO}^{-1}$ removida. De acordo com Chernicharo (2010) o valor nas condições normais de temperatura e pressão é de $0,35 \text{ Nm}^3\text{CH}_4.\text{kgDQO}^{-1}$ removida. Lobato et al. (2012) através do desenvolvimento de um modelo para estimativa do balanço de massa da DQO em reatores UASB obteve valores da produção de metano na faixa de 0,11 a $0,20 \text{ Nm}^3\text{CH}_4.\text{kgDQO}^{-1}$ removida, valor inferior a produção de biogás dos digestores anaeróbios de lodo. Noyola et al., 2016 verificaram diferentes cenários de tratamento de esgoto e o cenário onde o biogás é utilizado para geração de eletricidade diminuiu em 34% a emissão de CO_2 eq. (para um horizonte de 20 anos).

Para a estimativa de metano no biogás e no efluente de ETE, foi desenvolvido um software pela UFMG e SANEPAR, no qual a entrada de dados (concentração de DQO, vazão, população atendida) permite estimar a concentração de metano tanto no biogás e dissolvida no efluente. É possível estimar essa concentração em 3 diferentes cenários. No pior cenário o dado de entrada de eficiência de remoção de DQO é de 60%, a concentração de sulfato no afluente é de 80 mg/L, eficiência de redução de sulfato de 80% e perda de metano na fase gasosa é de 7,5%.

Em termos de energia, 1 m^3 de biogás com 75% de metano contém o equivalente a 1,4 kWh de eletricidade (KHAN et al., 2011).

2.8.1.1.1 Metano dissolvido no efluente

Embora o biogás produzido no reator UASB apresenta um elevado teor de metano (70-80%), grande quantidade permanece dissolvida na fase líquida e pode ser liberada com efluente final ou através de outra via (NOYOLA et al., 2006; SOUZA et al., 2011). O teor de metano encontrado por Souza et al. (2011) no efluente final foi de 1,4 à 1,7 mg/L nos diferentes sistemas estudados. De acordo com Daelman et al., 2012, a porcentagem de metano que a ETE recebe, ao ser formado pelo sistema de coleta, é substancial.

Gervasoni e Cantão (2011) estudaram o metano dissolvido em duas ETEs que empregam reatores anaeróbios. O valor encontrado foi de 10 mg/L de metano dissolvido.

Nelting et al. (2017) realizaram estudo em uma ETE com sistema de tratamento anaeróbio e encontraram o valor de 8,5 mg/L de metano dissolvido no efluente final.

2.8.2 Tratamento do biogás

Para o reaproveitamento do biogás, é necessário projetar tecnologias que o tratem até o nível exigido conforme o tipo de aproveitamento. Existe uma diferença entre a utilização de biogás e de biometano. O biogás, depois da remoção das principais impurezas como umidade, siloxanos e, principalmente, H_2S , pode ser utilizado para a produção de energia elétrica e energia térmica (aquecer, secar). Já o biometano é o resultado de uma purificação muito mais exigente e pode ser utilizado como substituto do gás natural veicular (GNV), sendo necessário, ainda, uma compressão e posterior armazenamento. Atualmente a injeção de biometano em rede de gás não é permitida no Brasil (BRASIL, 2015).

A qualidade do gás deve atender ao requerido pela tecnologia de conversão a ser adotada, sendo necessário observar além do poder calorífico, da produção e composição, outras propriedades, como a presença de umidade, pressão, contaminantes, gases inertes e ácidos. Se a qualidade do gás bruto não atender aos requisitos para aproveitamento energético do biogás, será necessário algum tipo de tratamento. Esse tratamento poderá ser menos sofisticado, no caso de usos simples, como a combustão direta, com a simples remoção do condensado; como em casos complexos, quando se deseja uma aplicação como biometano. Para o caso de ETEs no Brasil o uso mais recomendado é para a secagem de lodo (uso térmico – baixa exigência de purificação) ou a geração de energia elétrica (exigência de purificação mais elevada), ainda com a opção de aproveitamento de uma parcela de energia térmica (BRASIL, 2015). Para o uso de biogás em caldeira, este deve apresentar um teor mínimo de 50% de metano. Recomenda-se que o teor de compostos de enxofre seja inferior a 1.000 ppm, caso contrário deve ser previsto um tratamento preliminar (BRASIL, 2015).

2.8.2.1 Remoção de sulfeto de hidrogênio

É um gás incolor, mais pesado do que o ar com odor desagradável. Seu estado físico pode ser líquido sob pressão (BRASIL, 2002).

O H_2S começa a ser perceptível pela população em concentrações acima de 0,0001 ppm, possui cheiro desagradável quando suas concentrações são superiores a 0,5 ppm e quando atinge concentrações de 10 ppm pode causar irritações e náuseas. Quando as concentrações ultrapassam 50 ppm podem ocorrer lesões oculares e respiratórias e é considerado uma ameaça a vida, já acima de 700 ppm pode ser fatal (PARK et al. 2014). De acordo com Schirmer et al. (2007), a percepção do odor é acima de 0,00047 ppm. No Manual de Procedimentos para Auditoria no Setor de Saneamento Básico, o limite de detecção é na faixa de 0,0005-0,13 ppm (BRASIL, 2002).

Os processos de remoção de H_2S ou dessulfurização podem ser biológicos, químicos ou físicos. Os processos mais utilizados são a dessulfurização físico química por dosagem de ferro e a dessulfurização físico-química com óxido de ferro, hidróxido de ferro ou óxido de zinco. Este último é frequentemente denominado de esponja de ferro, pois pode ser usada palha de aço coberta com ferrugem para formar o leito de reação (BRASIL, 2015).

A oxidação com óxido de ferro é realizada através da interação de H_2S com um leito acondicionado de Fe_2O_3 e FeO , que pode ser na forma de resíduos de ferro ou minerais naturais (NOYOLA et al., 2006).

2.8.3 Destino final do biogás

Para o aproveitamento e recuperação energética do biogás, dois cenários são possíveis: O primeiro cenário consiste na queima direta do biogás, como acontece em aquecedores, fogões e caldeiras, e o segundo diz respeito à conversão de biogás em eletricidade, sendo ainda praticável a cogeração, geração conjunta de energia elétrica e térmica (ROSA, 2013).

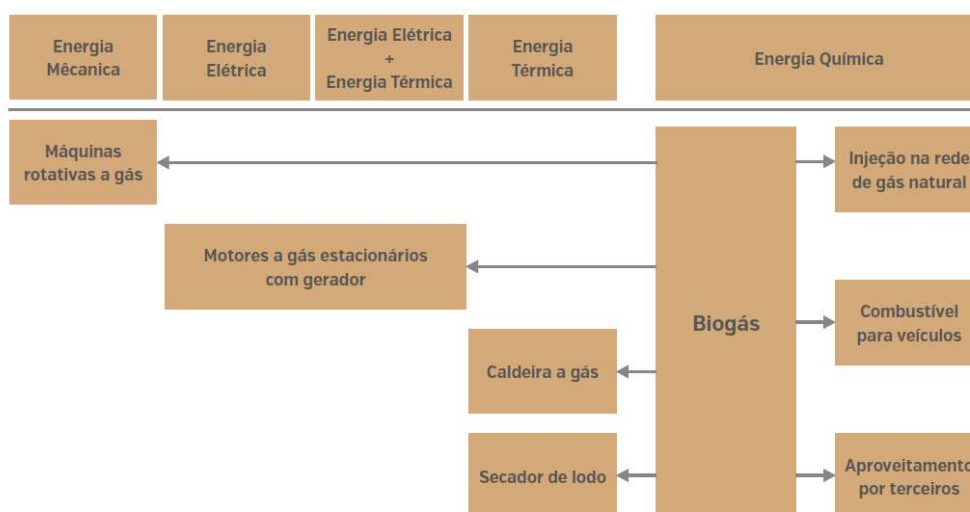
De acordo com Lobato (2011), a tecnologia com maior custo-benefício para o reaproveitamento do biogás é a combustão direta com reaproveitamento da energia térmica, podendo ser aplicada inclusive em ETEs de pequeno porte ou em reatores com baixa recuperação do metano. Dentre as alternativas de cogeração de

eletricidade e calor que emprega motores de combustão interna é a que apresenta mais vantagens com relação a fatores econômicos, confiabilidade e simplicidade tecnológica, favorecendo o seu uso em países em desenvolvimento.

Na geração de eletricidade pelo uso do biogás, Estados Unidos, Reino Unido e Alemanha são os países industrializados com maior capacidade instalada. A Alemanha encontra-se em uma posição de destaque por produzir 40% do biogás da União Européia, com geração de eletricidade em 7.470 plantas de conversão e capacidade total instalada de 2.290 MW (ROSA, 2013).

O guia técnico Probiogás apresenta algumas das principais alternativas para a utilização do biogás em ETES (FIGURA 20), entre as quais, a energia química pode também ser transformada em energia térmica, elétrica ou mecânica por meio de máquinas a gás e caldeiras.

FIGURA 20 - OPÇÕES PARA A UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS DE ETES.



FONTE: Probiogás (2015)

Stillwell et al. (2010) *apud* ROSA (2013) em estudos nos EUA, em 41 ETES operando com digestão anaeróbia de lodo entre as quais 5 ETES que realizavam a incineração do lodo desidratado, verificaram que o biogás coletado no tratamento e utilizado como fonte de energia contribuiu com a redução do consumo de eletricidade de 2,6 a 27%. Em adição, o emprego da combustão do lodo, com a finalidade de geração de energia elétrica, em combinação com o tratamento anaeróbio permitiu a redução no consumo de eletricidade de 4,7 a 83% (ROSA, 2013).

2.9 ACV APLICADO PARA ESCOLHA DE TECNOLOGIA NO GERENCIAMENTO DO LODO E DO BIOGÁS

A TABELA 8 demonstra o estado da arte com relação aos estudos que utilizaram a ferramenta de ACV para avaliação dos processos de tratamento e destinação do lodo biológico.

Todos os estudos citados avaliaram a categoria de mudanças climáticas. Com relação à melhor tecnologia de tratamento, os estudos divergem, sendo que naqueles que levaram em consideração os metais pesados, o cenário de destino agrícola não se demonstrou como a melhor opção ambientalmente. Com relação à análise dos poluentes emergentes, Hospido et al. (2010) observaram que a contribuição destes não é significativa, se comparada com os valores de metais.

Conforme observado na TABELA 8, não foram encontrados estudos que avaliem a gestão integrada de lodo e biogás gerados a partir de reatores UASBs, utilizando a técnica de avaliação de ciclo de vida.

TABELA 8 - ESTUDOS QUE UTILIZARAM A FERRAMENTA DE ACV PARA AVALIAÇÃO AMBIENTAL DOS DIFERENTES PROCESSOS DE TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO BIOLÓGICO.

(continua)

Referência	Software e região estudada	Metodo de avaliação do impacto	Categorias avaliadas	Título do Trabalho	Unidade funcional	Comentários
Houillon; Jolliet, 2005	Suíça	-	- Aquecimento global e - Recursos energéticos	<i>Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge: energy and global warming analysis</i>	1 tonelada de lodo seco.	Cenários: Uso agrícola, incineração, oxidação úmida, aterro, pirólise, e produção de cimento. O balanço energético sugere que a incineração e uso agrícola possuem o menor consumo de energia primária não renovável. Com relação ao aquecimento global, a incineração em fornos de cimento tem o melhor desempenho e aterro e uso agrícola o pior.
Tarantini et al., 2007	TEAM Software Itália	CML 1992 IPCC 1998 (100 years) USES 2.0 1998	- Acidificação terrestre; - Eutrofização; - Mudança Climática; - Ecotoxicidade aquática; - Toxicidade Humana; - Ecotoxicidade Terrestre; - Ecotoxicidade de sedimento; - Formação de oxidantes foroquímicos e - Esgotamento de recursos não renováveis.	<i>An environmental LCA of alternative scenarios of urban sewage sludge treatment and disposal</i>	1 tonelada de lodo seco.	Cenários: digestão anaeróbia do lodo seguido de incineração, a incineração do lodo não digerido, e digestão anaeróbio de lodo seguido de compostagem. Digestão de lodo seguida de incineração foi a melhor opção. Ecotoxicidade terrestre no cenário de compostagem foi alta devido aos metais.
Hong et al., 2009	Japão	USES-LCA	--Mudanças climáticas; - Acidificação; - Toxicidade humana; - Uso da terra.	<i>Environmental and economic life cycle assessment for sewage sludge treatment processes in Japan</i>	1 tonelada de lodo seco.	Realizaram um estudo considerando os impactos ambientais e económicos. A conclusão foi que o melhor cenário ambiental e economicamente foi o tratamento de lodo através do adensamento, digestão, desidratação e fusão.

TABELA 8 - ESTUDOS QUE UTILIZARAM A FERRAMENTA DE ACV PARA AVALIAÇÃO AMBIENTAL DOS DIFERENTES PROCESSOS DE TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO BIOLÓGICO.

(continuação)

Hospido et al., 2010	Espanha http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html .	CML 2000	- Eutrofização, - Aquecimento global, - Toxicidade humana e Ecotoxicidade terrestre	<i>Environmental assessment of anaerobically digested sludge reuse in agriculture: Potential impacts of emerging micropollutants</i>	Gerenciamento de 10L de lodo de uma mistura de lodo primário e secundário.	Estudaram a reutilização lodo de reatores anaeróbios da Espanha. Concluíram que a utilização agrícola é uma opção aceitável para destino de lodo de esgoto. Foco nos metais e poluentes emergentes, que foi uma novidade deste estudo. No entanto, os resultados obtidos indicam que a sua contribuição dos poluentes emergentes é menos importante do que os outros elementos considerados, isto é, metais pesados.
Wang et al., 2013	Taiwan SimaPro 7.2	IMPACT2002+	- Carcinogênicos; - Inorgânicos respiráveis não carcinogênicos; - Radiação ionizante; - Depleção da camada de ozônio; - Orgânicos respiratórios; - Ecotoxicidade aquática; - Ecotoxicidade terrestre; - Acidificação terrestre; - Eutrofização aquática; - Mudanças climáticas; - Energia não renovável.	<i>Environmental Effects of Sewage Sludge Carbonization and Other Treatment Alternatives</i>	1 tonelada de lodo seco.	Cenários dos processos de tratamento foram: combustão, aterro, co-incineração com resíduos sólidos urbanos, e mono-incineração. A conclusão foi que a melhor opção ambientalmente foi a combustão seguida de co-incineração e aterro. No entanto não foi considerado a emissão de metais pesados.
Liu, et al., 2013	China	-	-	<i>Life cycle GHG emissions of sewage sludge treatment and disposal options in Tai Lake watershed, China</i>	1 tonelada de lodo seco.	Cenários: aterro, mono-incineração, co-incineração, queima em olarias, co-processamento e uso agrícola. A mono incineração demonstrou ser o melhor cenário e o aterro o pior. Só foram avaliados os gases de efeito estufa.

TABELA 8 - ESTUDOS QUE UTILIZARAM A FERRAMENTA DE ACV PARA AVALIAÇÃO AMBIENTAL DOS DIFERENTES PROCESSOS DE TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO BIOLÓGICO.

(conclusão)						
Xu et al., 2014	China	ReCiPe	As 18 do recipe.	<i>Life-cycle environmental and economic assessment of sewage sludge treatment in China</i>	1 tonelada de lodo seco.	Avaliaram 13 cenários. Metais pesados contribuíram para o aumento do impacto ambiental na destinação de aterro. A opção de incineração foi a melhor opção ambientalmente e economicamente.
Mills et al., 2014	Reino Unido GaBi	CML 2001	<ul style="list-style-type: none"> - Potencial de aquecimento global (excluíram as emissões biogênicas); - Potencial de formação de foto-ozônio; - Potencial de eutrofização; - Acidificação; - Esgotamento de recursos minerais 	<i>Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies</i>	1 tonelada de lodo seco.	Este estudo comparou cinco configurações de tecnologia de tratamento e destinação do lodo biológico. Não considerou os metais no lodo. A aplicação do processo de hidrólise térmica melhora o desempenho econômico e ambiental.
Sadhukhan, 2014	Reino Unido GaBi 6.0	Não cita	<ul style="list-style-type: none"> - Acidificação; - Eutrofização; - Ecotoxicidade água doce; - Aquecimento global; - Toxicidade humana; - Ecotoxicidade marinha; - Ozônio fotoquímico e - Ecotoxicidade terrestre. 	<i>Distributed and micro-generation from biogas and agricultural application of sewage sludge: Comparative environmental performance analysis using life cycle approaches</i>	1 tonelada de lodo seco.	O estudo compara 6 opções de tecnologia para a produção combinada de calor e energia a partir do biogás gerado na digestão do lodo. A célula com membrana de troca de prótons foi a melhor opção.
Garrido-Baserba et al., 2015	Espanha NovEDAR_ EDSS	Não cita	- Apenas mudanças climáticas	<i>Selecting sewage sludge treatment alternatives in modern wastewater treatment plants using environmental decision support systems</i>	Equivalente gerado para uma população de 1 milhão.	Avaliou 5 alternativas para o tratamento do lodo. Estudou aspectos ambientais e econômicos. A oxidação supercrítica da água foi a melhor opção para critérios econômicos e ambientais.

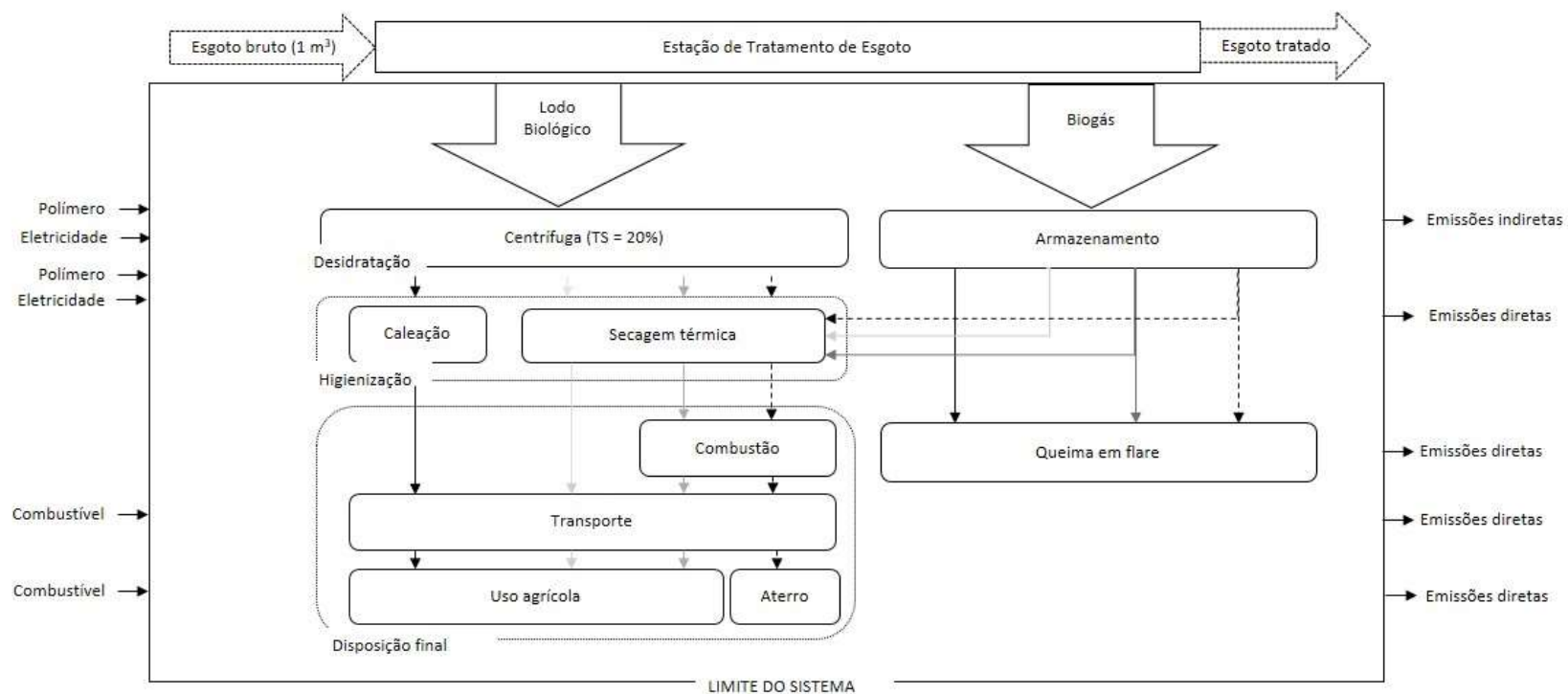
3. MATERIAIS E MÉTODO

3.1 DELINEAMENTO DO TRABALHO

A unidade funcional do estudo é o gerenciamento dos subprodutos, lodo biológico e biogás, gerados ao tratar 1 m³ de efluente doméstico, englobando as fases de tratamento e destino final. Os fluxos de referência são de 0,052 Nm³ de biogás captado do separador e 2,51 kg de lodo biológico, obtidos de reator anaeróbio tipo UASB (ST = 2,6%). Foi considerado também, o metano dissolvido no efluente tratado (8,5 mg/L). Os fluxos foram obtidos por meio de levantamento realizado na ETE estudada e sistema piloto abrangendo o período de 2011 – 2017. O limite do sistema, destacando o estudo de caso e cenários propostos, é apresentado na FIGURA 21.

O cenário base corresponde ao estudo de caso da ETE estudada. O lodo estabilizado é desaguado em uma centrífuga e posteriormente submetido à EAP, com cal virgem. O lodo higienizado é encaminhado para a destinação agrícola e o biogás gerado pelos reatores é destruído em queimadores abertos com baixa eficiência. O cenário 1 corresponde à rota onde o biogás gerado é utilizado como fonte de calor para a secagem e higienização do lodo em secador rotativo. O lodo seco e higienizado é encaminhado para a agricultura. O cenário 2 corresponde à rota onde é realizada a combustão do lodo para utilização do calor na secagem do lodo desaguado. O poder calorífico não é suficiente, sendo utilizado um percentual do biogás gerado. As cinzas são destinadas para a agricultura. O cenário 3 é semelhante ao cenário 2, sendo a destinação final das cinzas o aterro sanitário.

FIGURA 21 - ROTAS CONSIDERADAS NESTE ESTUDO COM RELAÇÃO AO TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DO LODO BIOLÓGICO E BIOGÁS



Legenda : Cenário base —> Lodo sendo desaguado na centrífuga, submetido à EAP e destinado na agricultura. O biogás é queimado em flare aberto.

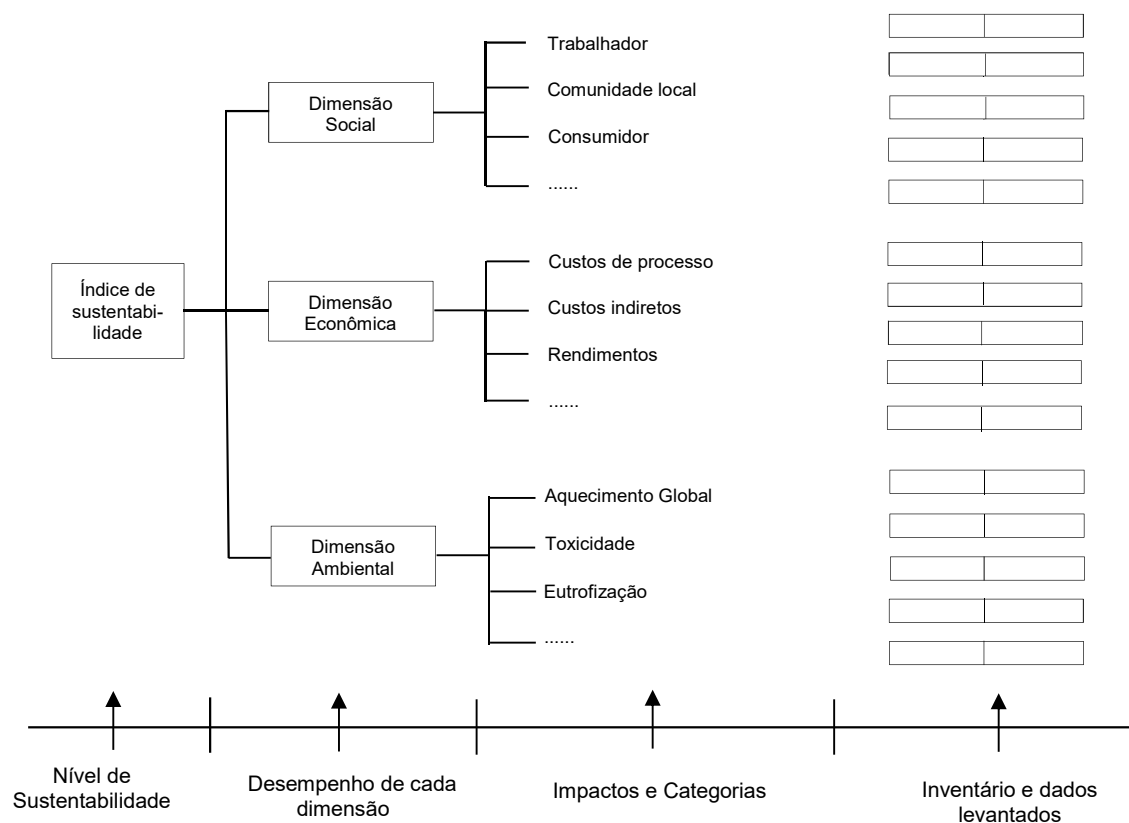
Cenário 1 —> Biogás é utilizado como fonte de calor para a secagem do lodo biológico em secador rotativo. O lodo seco é destinado na agricultura.

Cenário 2 —> É realizada a combustão do lodo para a utilização do calor na secagem do lodo desaguado. As cinzas são destinadas na agricultura.

Cenário 3 --> Semelhante ao cenário 2, sendo as cinzas disposta no aterro sanitário.

A metodologia utilizada para a realização deste trabalho baseou-se na ACV e avaliações associadas (CCV, ACV-S e ASCV). A FIGURA 22 demonstra o esquema de avaliação para a abordagem das três dimensões da sustentabilidade.

FIGURA 22 - ESQUEMA DE AVALIAÇÃO DAS 3 DIMENSÕES DA SUSTENTABILIDADE.



FONTE: FINKBEINER (2010); ZORTEA (2015).

3.1.1 Área de estudo

A ETE sob investigação se situa no município de Curitiba – PR, atendendo a Bacia do Ribeirão Padilha. A ETE possui capacidade para tratar 440 L/s de esgoto doméstico, atendendo uma população de até 235.000 habitantes. No que diz respeito ao tratamento preliminar do esgoto, a ETE é dotada de duas grades mecanizadas com espaçamento de 3 mm e um desarenador tipo Dorr - Oliver. Para a etapa de tratamento biológico do esgoto, possui seis reatores tipo UASB (tratamento secundário) e duas lagoas facultativas aeradas (pós-tratamento), estas unidades podem ser vistas na imagem de satélite apresentada na FIGURA 23. O lodo biológico

produzido nos reatores UASB e na lagoa aerada é periodicamente descartado, sendo adensado (adensador por gravidade) e, posteriormente, desaguado em uma centrífuga. Após, o lodo é submetido ao processo de estabilização alcalina prolongada na denominada UGL (BITTENCOURT, 2014) e destinado na agricultura. O biogás, gerado pelos reatores UASB, é queimado em *flare* aberto, com uma eficiência de aproximadamente 50% (KAMINSKI, 2017).

FIGURA 23 - IMAGEM AÉREA DA ETE ESTUDADA COM AS REPECTIVAS UNIDADES DE TRATAMENTO



FONTE: Google Earth (2018).

3.2 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA – AMBIENTAL

3.2.1 Definição de objetivo e escopo

O objetivo desta etapa do trabalho é realizar a avaliação dos potenciais impactos ambientais dos 4 cenários de gerenciamento do lodo e biogás.

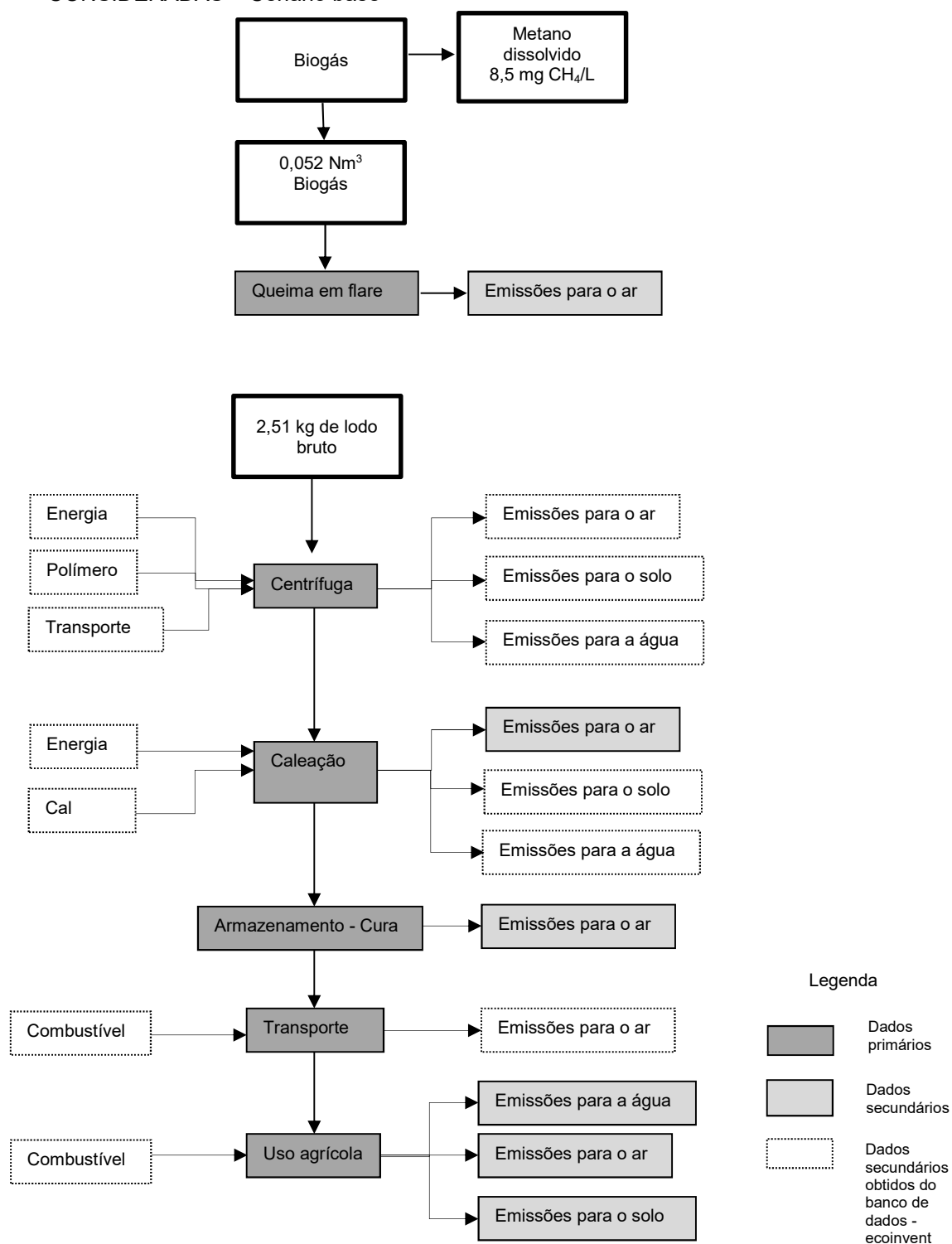
3.2.2 Elaboração dos Inventários Ambientais

3.2.2.1 Inventário Ambiental - Cenário base

Para a elaboração do inventário do ciclo de vida do tratamento e disposição final do lodo, adotaram-se as diretrizes das normas da série ISO 14.040. Inicialmente,

realizou-se um mapeamento dos fluxos de massa e de energia inerentes ao processo. As variáveis consideradas nesse mapeamento estão representadas no fluxograma ilustrado na FIGURA 24.

FIGURA 24 – FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS COM AS ETAPAS CONSIDERADAS – Cenário base



Os dados para elaboração do fluxo de massa (volume de lodo equalizado e desaguado, teor de sólidos totais, consumo de polímero e cal) foram obtidos pelo estudo realizado na mesma ETE por Koga (2016). O mapeamento dos fluxos de energia foi realizado pelo levantamento das potências dos equipamentos e horas de funcionamento.

As características do lodo bruto, desaguado e eficiência da centrífuga são demonstrados na TABELA 9.

TABELA 9 - TEOR DE SÓLIDOS SECOS E MASSA CORRESPONDENTE DO LODO BIOLÓGICO ANAERÓBIO DA ETE

Material	ST (%)	Massa (kg)*
Lodo Bruto Equalizado	2,60	2,51
Lodo desaguado	19,95	0,31
Clarificado (Saída da Centrífuga)	0,17	-
Captura da Centrífuga (%)	93,7	-

FONTE: *KOGA (2016)

NOTA: Média das medições realizadas mensalmente no decorrer do ano de 2014.

Os dados de volume de lodo, teor de sólidos totais, consumo de polímero, consumo de cal virgem, volume de lodo desaguado e de consumo de energia elétrica de todos os equipamentos utilizados pelo tratamento do lodo são referentes aos anos de 2014 e 2015 (Koga, 2016). No levantamento do consumo de energia da etapa de desaguamento do lodo foram considerados os seguintes equipamentos: bomba dosadora do polímero, agitadores do tanque de polímero, centrífuga e rosca transportadora do lodo. Para a determinação da massa de lodo, expressa em kg, foram utilizadas as densidades dos lodos (1.030 kg/m^3 para o lodo bruto e 1.050 kg/m^3 para o lodo desaguado) descritas por Andreoli et al. (2014).

As emissões referentes ao transporte dos produtos consumidos no tratamento do lodo e da destinação do lodo até a área agrícola foram reportadas em função da unidade tkm, que considera a quantidade transportada (em toneladas) e a distância percorrida, ida e volta (em quilômetros). Utilizou-se as distâncias dos fabricantes dos produtos químicos até a ETE e, com relação ao destino agrícola, utilizou-se a média das distâncias das áreas agrícolas receptoras, dos últimos 4 anos. Os valores são os apresentados na TABELA 10.

TABELA 10 - DISTÂNCIA DAS FORNECEDORAS DOS PRODUTOS QUÍMICOS E ÁREA AGRÍCOLA ATÉ A ETE ESTUDADA

Item	Distância - ida e volta (km)
Cal virgem	102 ¹
Polímero	926 ¹
Área agrícola	187,2 ²

FONTE: ⁽¹⁾ SANEPAR (2015); ⁽²⁾ BITTENCOURT (2014)

O consumo de combustível referente à pá carregadeira, utilizada para a caleação do lodo biológico, e do equipamento utilizado para a aplicação do lodo na área agrícola são de 13 L/h e 10 L/h respectivamente, conforme contato com a empresa responsável. Os valores de capacidade foram de 85 t/dia e de 200 t/dia respectivamente, conforme informado pela empresa que realizou os serviços. O poder calorífico do diesel utilizado é de 3,85 kWh/L. As emissões diretas para a atmosfera, relacionadas ao uso da pá carregadeira para caleação e da aplicação do lodo, foram calculadas em função de fatores de emissão para motores diesel, apresentados na TABELA 11 (BRASIL, 2011).

TABELA 11 – EMISSÃO DE GASES DA PÁ CARREGADEIRA E DA APLICAÇÃO DO LODO BIOLÓGICO

Gases	CO	NOx	Material particulado
Fator de emissão (g/kWh)	0,830	1,800	0,018

FONTE: BRASIL (2011).

As emissões referentes à aplicação da cal virgem para higienização (perdas de N e C, expressas em NH₃ e CO₂) foram calculadas pelos teores de N e C no lodo antes da aplicação da cal, sendo adotado o valor de 2,81% para o N (ANDREOLI et al., 2014; AISSE, FERNANDES, SILVA, 2001) e 15% para o C (ROSS et al., 2014). As emissões referentes à aplicação na agricultura seguiram os modelos apresentados por Nemecek e Schnetzer (2011). Os modelos utilizados estão apresentados na TABELA 12.

TABELA 12 - MODELOS UTILIZADOS PARA CÁLCULO DAS EMISSÕES RELACIONADAS À APLICAÇÃO DO LODO BIOLÓGICO NA AGRICULTURA

Emissão	Parâmetro	Modelo Utilizado
Ar	NH ₃	AGRAMMON MODEL
	N ₂ O	IPCC method
	NO _x	IPCC method
Águas subterrâneas	NO ₃	SQCB
	PO ₄	SALCA – P
	Metal pesado	SALCA-Heavy metal
Águas superficiais	PO ₄	SALCA – P
Solo	Metal pesado	SALCA-Heavy metal

FONTE: NEMECEK, SCHNETZER (2011).

Os dados de entrada para o modelo (teor de N e P no lodo biológico e no solo) foram levantados de acordo com a média dos últimos 3 anos, das regiões que receberam o lodo. Foi considerado um solo do tipo Cambissolo Háplico (utilizado no ano de 2013 como receptor de lodo) para o levantamento de características específicas do solo (teor de argila, carbono orgânico e quantidade de solo erodido). O valor de precipitação utilizado foi a média anual apresentada pelo SIMEPAR² (2015). Na aplicação do biossólido no solo, foram considerados como produtos evitados a ureia (com teor de 45% de Nitrogênio), fertilizante fosfatado (P₂O₅) e calcário.

Para a concentração dos metais pesados no lodo biológico, foi utilizado a média dos dados referentes aos anos de 2011, 2012 e 2013, sendo 15 lotes de lodo analisados. A média dos valores dos 15 lotes é apresentado na TABELA 13.

TABELA 13 - CONCENTRAÇÃO DE METAIS PESADO NO LODO TRATADO POR EAP. OS VALORES REPRESENTAM A MÉDIA DA CONCENTRAÇÃO DE 15 LOTES NO DECORRER DE 3 ANOS.

	Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Hg
Média	0,09	68,96	513,98	23,50	17,68	28,15	1,93
(mg/kg)							

FONTE: BITTENCOURT (2015)³

NOTA: Os valores representam a média da concentração de 15 lotes no decorrer de 3 anos.

Os dados referentes à fabricação dos produtos evitados no uso agrícola (fósforo, ureia e calcário), fabricação do polímero, fabricação da cal, transporte, diesel

² Comunicação pessoal através de formulário de solicitação.

³ BITTENCOURT, S. Comunicação Pessoal. Curitiba, SANEPAR, 2015.

e de energia elétrica foram obtidos por meio do banco de dados do Ecoinvent_v3. A nomenclatura dos dados utilizados são demonstrados na TABELA 14.

TABELA 14 - ELEMENTOS UTILIZADOS DO BANCO DE DADOS DO ECOINVENT V3

	Elemento do ecoinvent
Nitrogênio	Nitrogen fertiliser, as N {RoW} urea ammonium nitrate production Alloc Rec, U
Fósforo	Phosphate fertiliser, as P2O5 {RoW} single superphosphate production Alloc Def, U
Polímero	Acrylonitrile {RoW} Sohio process Alloc Def, U
Eletricidade	Electricity, medium voltage {BR} electricity voltage transformation from high to medium voltage Alloc Def, U
Cal virgem	Quicklime, milled, loose {RoW} production Alloc Def, U
Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}
Diesel	Diesel, low-sulfur {RoW} production Alloc Def, U
Calcário	Limestone, crushed, for mill {RoW} production Alloc Def, U

FONTE: ECOINVENT, 2016.

Com relação ao calcário foi considerado seu Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) de 75% e para cal virgem (contida no lodo biológico) um PRNT de 110% (BITTENCOURT, 2014).

Com relação à composição do biogás, foram utilizados os valores de composição volumétrica apresentados por Lobato et al. (2012), conforme apresentado na TABELA 15, e uma eficiência de queima de 50% em *flare* (Ver item 2.6.1.1). O teor de metano foi calculado utilizando o *software* Probio 1.0 (pior cenário), levando em consideração a carga afluyente diária e calculada mensalmente pelo *software* nos anos de 2014 e 2015. A vazão média foi de 29.297 m³/dia e a concentração de DQO de 545 mg/L. Com relação ao metano dissolvido no efluente, foram utilizados os valores medidos e apresentados por Nelting et al. (2017) em estudo na mesma ETE, sendo o valor de 8,5 mg CH₄/L. Esta concentração foi utilizada em todos os cenários.

TABELA 15 – PRODUÇÃO, COMPOSIÇÃO E MASSA CORRESPONDENTE DE CADA COMPONENTE DO BIOGÁS (0,052 Nm³)

Composição do biogás	Valor (%)	(m ³)	Densidade (kg/m ³)	kg
		Volume		Massa
Metano	69,43% ⁽¹⁾	0,036	0,717	0,026
Dióxido de carbono	10% ⁽²⁾	0,005	1,98	0,010
Nitrogênio	17,5% ⁽²⁾	0,009	1,1455	0,010
Ácido sulfídrico	1500 ppmv ⁽²⁾	7,8E-5	1,54	1,2E-4
Hidrogenio	0,35% ⁽²⁾	0,001	0,08988	1,4E-4
Total		0,052		0,047

FONTE: ⁽¹⁾ PROBIO (2015); ⁽²⁾ LOBATO (2014)

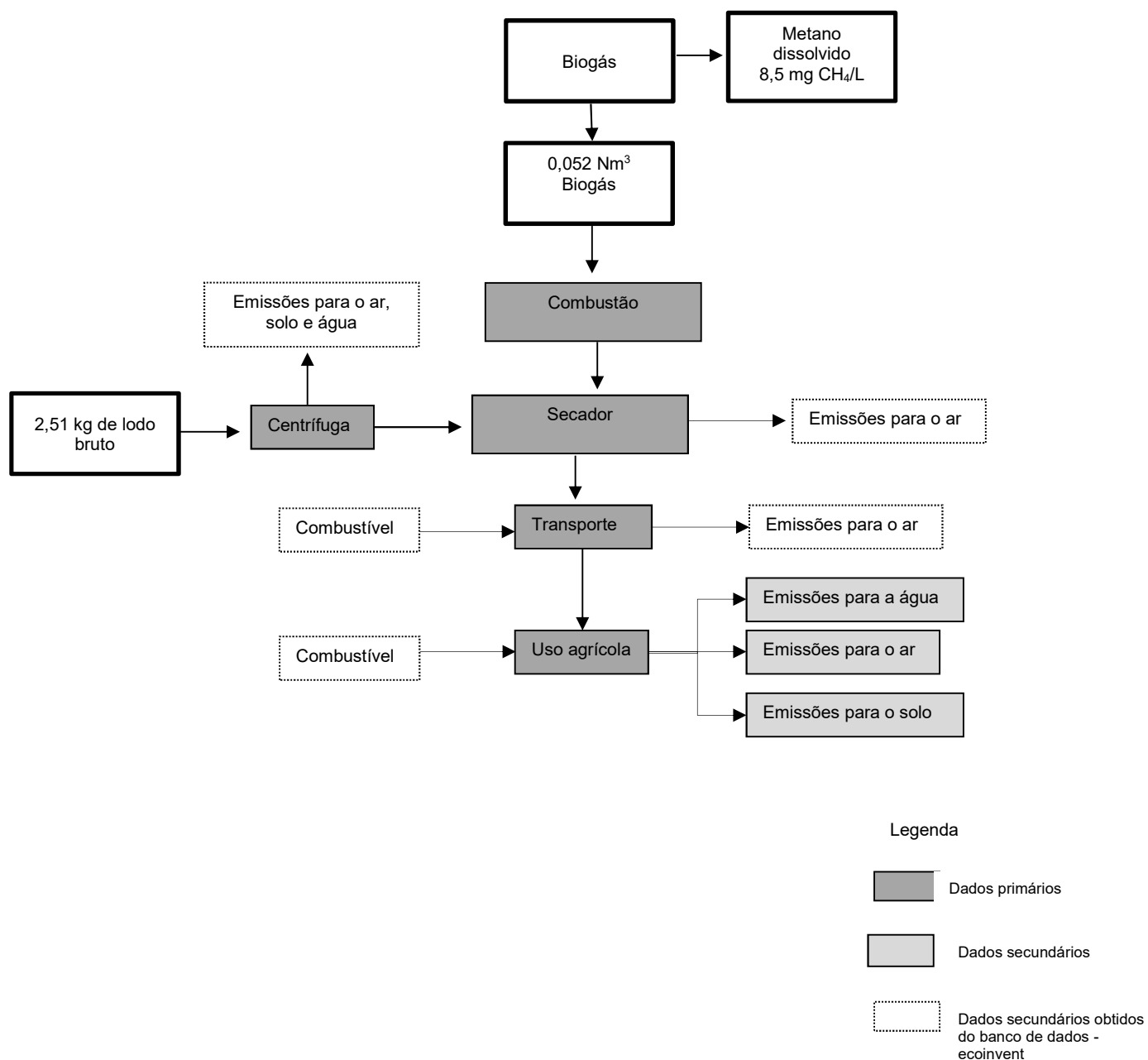
Com relação à concentração de metano no efluente dissolvido, foi utilizado o estudo realizado por Nelting et al. (2017). A concentração de CH₄ no efluente final utilizada foi de 8,5 mg CH₄/L.

Para a análise de incerteza foi utilizada a simulação Monte Carlo. Para usar esta simulação, o desvio padrão de cada entrada do ciclo de vida do inventário foi obtido pela combinação de Matriz Pedigree, Matriz Básica de Incerteza e Vetor Pedigree.

3.2.2.2 Inventário Ambiental – Cenário 1

O inventário ambiental referente ao cenário 1 (FIGURA 25) foi elaborado com dados do secador rotativo instalado em uma ETE em Curitiba, Paraná e apresentado por Possetti et al. (2015). A metodologia para elaboração do inventário referente às etapas de centrifugação e aplicação agrícola foi a mesma apresentada para o cenário base.

FIGURA 25 – FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS COM AS ETAPAS CONSIDERADAS– Cenário 1.



Os resultados e dados do sistema piloto instalado são apresentados na TABELA 16.

TABELA 16 - RESULTADOS E DADOS OPERACIONAIS DO SISTEMA PILOTO DE SECAGEM TÉRMICA DE LODO ANAERÓBIO

Vazão operacional de alimentação do lodo biológico	94,83 (\pm 33,75) kg/h
Sólidos totais do lodo de entrada do sistema	23,49 (\pm 1,41) %
Sólidos totais do lodo de saída do sistema	83,96 (\pm 1,33) %
Redução da massa de lodo	79%
Vazão de biogás utilizada no sistema	15,07 (\pm 7,51) Nm ³ /h

FONTE: Adaptado de POSSETTI et al. (2015).

NOTA: Secador térmico rotativo operando em sistema piloto.

As emissões atmosféricas do secador foram levantadas de acordo com a medição realizada em 10 de junho de 2013 e registrada no Relatório de Análise 04ALB.2013/074, emitido pelo Laboratório Átomus Emissões Atmosféricas.

Para o cálculo de consumo de energia, foram utilizados dados da Proposta Técnica/Comercial N° 382/2014, atualizada em 2017 (ALBRECHT, 2014; ALBRECHT, 2017). O consumo de energia do secador é de 75 kWh, para uma capacidade de 600 kg de lodo/hora.

Os dados agronômicos para o cálculo dos produtos evitados (Ureia e Superfosfato) e concentração de metais foram levantados de acordo com o laudo realizado do lodo da saída do secador em 27 de maio de 2013 e disponibilizado pela Companhia⁴. Os laudos representam os lotes retirados 3 vezes por dia no decorrer de 1 ano. Os valores das concentrações de metais utilizados são apresentados na TABELA 17.

TABELA 17 - CONCENTRAÇÃO DE METAIS PESADO NO LODO TRATADO POR SECAGEM TÉRMICA.

	Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Hg
Média	0	110,2	160,4	14,1	34,8	0	0
(mg/kg)							

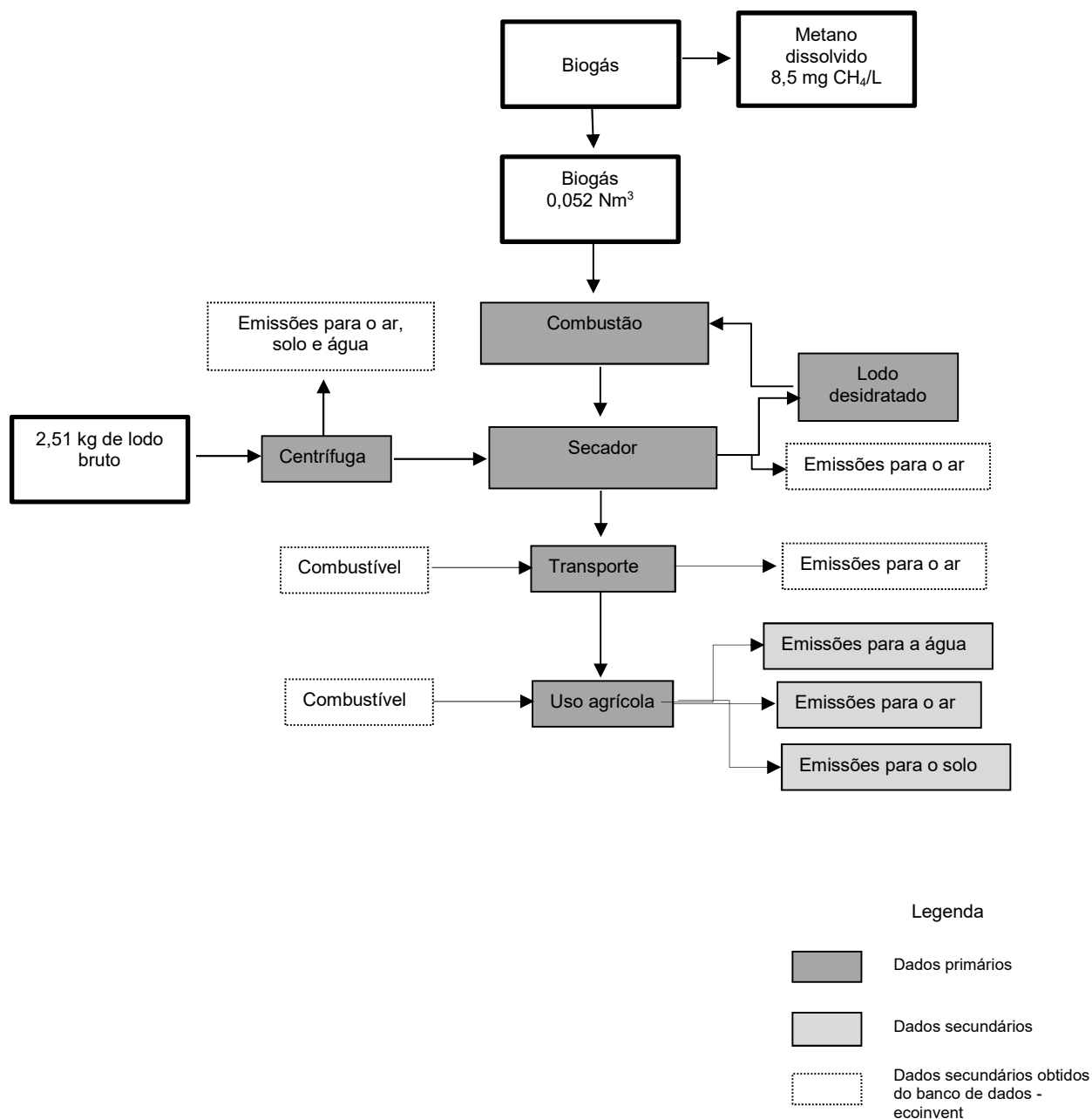
NOTA: Os valores representam os lotes retirados 3 x por dia no decorrer de 1 ano.

⁴ Comunicação pessoal.

3.2.2.3 Inventário Ambiental – Cenário 2

No cenário 2 (FIGURA 26) ocorre a combustão do lodo, sendo a cinza destinada na agricultura. O poder calorífico inferior do lodo biológico seco é de 2.497,84 kcal/kg (POSSETTI et al., 2015).

FIGURA 26 - FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS COM AS ETAPAS CONSIDERADAS– Cenário 2



Para o cálculo dos produtos evitados e concentração de metais das cinzas, foi realizado a simulação da combustão do lodo anaeróbio na mufla, no Laboratório de Análises Ambientais - LABEAM do DHS/PPGERHA, com uma temperatura de 1000°C, por aproximadamente 3 horas. Os valores das concentrações dos metais (média de 3 análises realizadas) são apresentados na TABELA 18.

TABELA 18 - CONCENTRAÇÃO DE METAIS PESADO NA CINZA RESULTANTE DA COMBUSTÃO DE LODO ANAERÓBIO..

	Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Hg
Média	0	204,45	310,90	0	104,60	46,65	0
(mg/kg)							

FONTE: O AUTOR

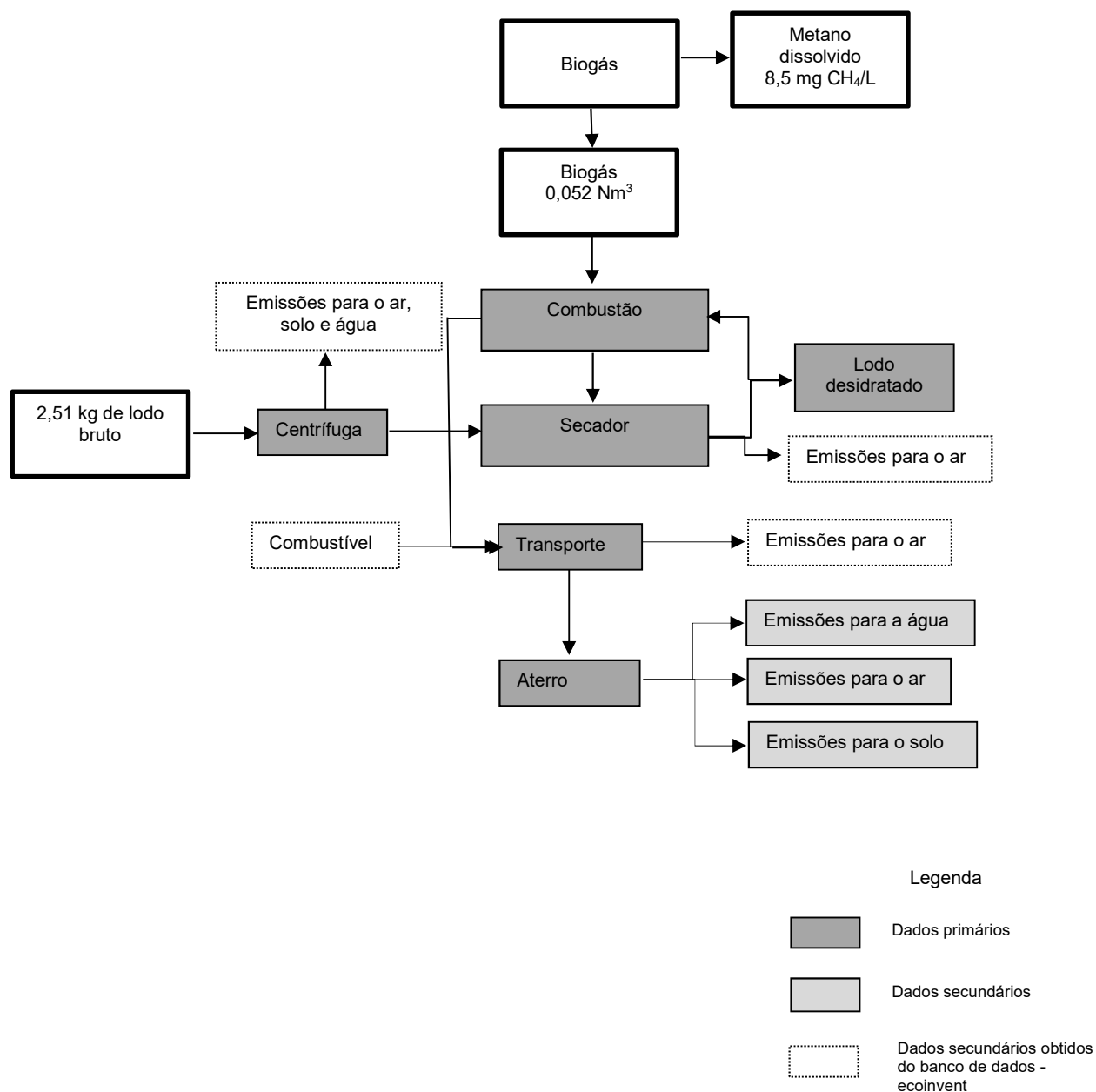
NOTA: Os valores representam a média das 3 análises realizadas.

3.2.2.4 Inventário Ambiental – Cenário 3

O cenário 3 é semelhante ao cenário 2, sendo as cinzas destinadas para o aterro sanitário (FIGURA 27).

Nesse cenário foi utilizada a distância de 27 km, considerando ida e volta, da ETE até o aterro, sendo que essa é a distância da ETE até o aterro que a SANEPAR possuía contrato para disposição e resíduos no ano de 2016. Para a elaboração do inventário ambiental foi utilizada a mesma metodologia do cenário 2, sendo utilizado os dados de aterro sanitário do Ecoinvent v3 (Municipal solid waste {RoW}| treatment of, sanitary landfill | Alloc Def, U).

FIGURA 27 - FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS COM AS ETAPAS CONSIDERADAS– Cenário 3



3.2.3 Avaliação dos impactos ambientais

Para a realização do cálculo do impacto ambiental foi utilizada a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida e suas fases, utilizando o *software* SimaPro 8.4. Para a avaliação dos impactos ambientais existem diferentes estudos que fazem uso de metodologias variadas (RENOU et al., 2008). No presente estudo empregou-se o método ReCiPe 2016 Midpoint (H). As categorias de impactos avaliadas foram: mudança climática (MC), depleção de ozônio estratosférico (DOE), formação de

ozônio, ecossistemas terrestres (OET), acidificação terrestre (AT), eutrofização aquática (água doce) (EUT-AD), ecotoxicidade terrestre (ET), ecotoxicidade água doce (EAD) e toxicidade humana, não cancerígena (TH).

Hernandez-Padilla et al. (2017) avaliaram 3 diferentes metodologias de avaliação de impacto: ReCiPe, Impact 2002+ e IMPACT World+ (IW+). A IW+ é a única metodologia que fornece fatores de caracterização diferenciados para a região da América Latina e Caribe (ALC) e tem potencial para produzir resultados mais precisos em termos de representatividade geográfica. No entanto o método ReCiPe possui duas categorias de impactos (Mudança Climática e Depleção de Ozônio) com abrangência de aplicação Global (MENDES, 2013) e sendo que este método ou o método CML (baseado a sua evolução) foram utilizados em vários estudos relacionados ao tratamento de águas residuárias/lodo biológico (XU et al., 2014; MILLS, et al., 2014; TARANTINI et al., 2007, HOSPIDO et al., 2010; NOYOLA et al., 2013).

Para análise de incerteza utilizou-se a matriz pedigree através de uma simulação Monte Carlo no software. Para esta simulação, o desvio padrão (DP) de cada entrada do ciclo de vida do inventário foi obtido pela combinação da Matriz Pedigree, Matriz da Incerteza Básica e Vetor Pedigree. O vetor Pedigree, resultante da classificação feita neste estudo, bem como a Incerteza Básica e o Desvio Padrão de cada entrada, estão apresentados no Apêndice 1.

3.3 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA SOCIAL

3.3.1 Elaboração dos inventários sociais

Para a elaboração do inventário social foram consideradas as seguintes categorias de *stakeholders*: trabalhadores, consumidores e comunidade local e sociedade (UNEP/SETAC, 2009). Para cada subcategoria foram elaborados indicadores (TABELA 19), selecionados de acordo com o sugerido pela UNEP e SETAC (2013) e estudo realizado por Padilla-Rivera et al. (2016), em que são apresentados os principais aspectos sociais associados com tratamento de águas residuárias.

A fim de produzir um método consistente para todas as subcategorias, a metodologia estabelece uma linha de base para avaliar o perfil da organização, chamado requisito básico (RB). Como exemplo, na subcategoria “salário justo”, a metodologia estabelece o salário mínimo como RB. Os requisitos básicos foram definidos de maneira semelhante ao adotado por Ramirez et al. (2014).

TABELA 19 - SUBCATEGORIAS E INDICADORES CONSIDERADOS PARA ELABORAÇÃO DOS INVENTÁRIOS SOCIAIS.

TRABALHADORES		Requisito básico/ Legislação aplicável
Faixa salarial	Valores dos salários pagos aos trabalhadores	SAI (2008) No. VIII Remuneração Lei PR 18.766/2016 - Salário Mínimo
Saúde e segurança	Nível de ruído ocupacional	SAI (2008) No. III Saúde e segurança NR 15 NIOSH
	Utilização de produto químico perigoso	
	Emissões gasosas consideradas prejudiciais aos trabalhadores (CH ₄ e H ₂ S) / Emissão de odor (H ₂ S e NH ₃)	
	Riscos biológicos (bactérias, fungos, vírus)	
CONSUMIDORES		
Qualidade do lodo tratado	Teor de N e P	CONAMA 375/2006
	Atendimento aos parâmetros estabelecidos pela legislação	SEMA 21/2009
Saúde e segurança	Valores de patógenos presentes no lodo	
COMUNIDADE LOCAL E SOCIEDADE		
		IFC (2007), AA100 Stakeholder Engagement Standard, United Nations Global Compact, Principle 1
Condições de vida segura e saudável	Nível de ruído ambiental	CONAMA 01/1990 NBR 10.151/2000 Lei 10625/2002
	Emissão de odor	SEMA 16/2014
Contribuição para o desenvolvimento econômico	Tecnologia utilizada	IFC (2007), AA100 Stakeholder Engagement Standard
	Capacidade de geração de emprego	

Os parâmetros referentes à qualidade do lodo tratado abrangeram os anos de 2011, 2012 e 2013. Quanto aos salários pagos aos trabalhadores, considerou-se o ano base de 2016.

No monitoramento e mapeamento do odor em ETE foram realizadas medições das concentrações de H₂S em determinados pontos da ETE e em sua vizinhança. Executou-se a medição em 21 pontos (FIGURA 29) em 3 campanhas, às 14 horas, utilizando-se aparelho detector de H₂S, JEROME, modelo 631-X (FIGURA

28), com limite de detecção de 0 a 50 ppm. Foi possível a medição em todos os pontos pela alta precisão do equipamento (0,001 ppm). Simultaneamente, realizou-se a medição de H_2S por 3 dias utilizando o aparelho detector de gás sulfídrico GASTEC Corporation versão 5.06.000, Modelo GHS-8AT (FIGURA 28), com limite de detecção de 0 a 3000 ppm, medição a cada 5 segundos e armazenamento da média das concentrações a cada 5 minutos. Essas medições foram realizadas para verificação do horário de pico da concentração. Foram realizadas medições nas canaletas, únicos locais que permitiram medição (FIGURA 28), devido à baixa precisão desse equipamento (25 ppm). Procedeu-se a instalação de 3 equipamentos, um em cada canaleta de reator anaeróbio (UASB). Os gráficos dos resultados são demonstrados no Apêndice 2. Posteriormente, os dados dos demais pontos foram convertidos para determinação dos valores no horário de pico.

FIGURA 28 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA MEDIÇÃO DE H_2S .



a) Equipamento Jerome.



b) Equipamento Gastec.



c) Equipamento Gastec posicionado nas canaletas dos reatores UASB.

A medição de NH_3 foi feita no dia que estava sendo realizada a caleação do lodo biológico na UGL, utilizando-se um detector portátil de gases no meio atmosférico, marca BW Technologies, Alert Micro 5 (precisão de 25 ppm). Os dados coletados foram inseridos no ArcGis 10.1 para reproduzir as curvas de concentração do gás, utilizando-se a interpolação.

Os valores de direção e velocidade do vento, obtidos junto ao SIMEPAR para os 3 dias que foram realizadas as medições (01 – 03/02/2017), mostraram uma velocidade média de 0,39 m/s, sendo a direção predominante a leste.

FIGURA 29 – IMAGEM AÉREA DA ETE ESTUDADA COM OS PONTOS DE MEDIÇÃO DE H_2S E NH_3 .



NOTA: (1) Reatores UASB; (2) UGL; (●) Pontos de medição.

De acordo com a Lei Municipal 10.625, que dispõe sobre ruídos urbanos, deve ser realizada uma medição em cada turno: diurno (07h01min às 19h00), vespertino (19h01min às 22h00) e noturno (22h01min às 07h00) (CURITIBA, 2002).

A medição foi realizada utilizando-se um decibímetro modelo ICEL DL-4200. Cada medição teve duração de 5 minutos nos pontos escolhidos (FIGURA 30) e considerou-se a média dos valores.

De acordo com a Lei 9.800 (2000), que dispõe sobre o Zoneamento, Uso e Ocupação do Solo no Município de Curitiba, a ETE se localiza no Setor de transição – ST, que é definida como áreas limítrofes à zoneamentos conflitantes, onde se pretende amenizar os impactos de uso e ocupação do solo (CURITIBA, 2000). Neste zoneamento são permitidos habitação coletiva e institucional, comércio e indústrias.

FIGURA 30 – IMAGEM AÉREA DA ETE ESTUDADA COM OS PONTOS DE MEDIÇÃO DE RUÍDO AMBIENTAL.



OBS. (P1) Elevatória; (P2) Centrífuga; (P3) Lagoa e (P4) Rodovia.

Os valores de ruídos ocupacionais foram fornecidos pela companhia de saneamento da ETE estudada com relação ao cenário base, sendo realizada a dosimetria de ruído em Janeiro/2016. Para os demais cenários, foram realizadas medições no sistema piloto do secador rotativo instalado em outra ETE também localizada no município de Curitiba.

3.3.2 Avaliação dos impactos sociais

Para a realização da avaliação dos impactos sociais foi utilizada uma adaptação das metodologias descritas por Ramirez et al. (2014), Zortea (2015) e Padilla-Rivera et al. (2016), onde se consideram quatro elementos: a organização como um processo unitário, definição de um requisito base, atribuição de níveis de avaliação e atribuição de um caráter semi-quantitativo para o método, conforme demonstrado na TABELA 20.

TABELA 20 - CONVERSÃO DOS DADOS SOCIAIS QUALITATIVOS EM SEMI-QUANTITATIVOS

Nível de evidência	Sem dados disponíveis	Fora do comprometimento e sob riscos físicos,- psicológicos, de segurança ou de direitos humanos	Não cumprimento ao requisito básico	Cumprimento ao requisito básico	Excelente desempenho, além do requisito básico
Escore atribuído	0	1	2	3	4

FONTE: Adaptado de RAMIREZ et al. (2014) e PADILLA-RIVERA et al. (2016)

3.4 ANÁLISE DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA - ACCV

O inventário econômico foi elaborado pelo método de análise dos custos do ciclo de vida – ACCV. O método é baseado na Avaliação do Ciclo de Vida, mas considera os custos econômicos no lugar dos impactos ambientais.

Foram levantados os custos referentes ao consumo de energia, produtos químicos, pessoal, aquisição dos equipamentos e manutenção, aplicados à ETE descrita no cenário base e propostos. A TABELA 21 resume os custos envolvidos para o tratamento e destinação.

Os dados referentes aos custos e consumo de produtos foram fornecidos pela SANEPAR⁵ e levantados com os fornecedores dos produtos. Os valores foram transformados para o Valor Presente Líquido, utilizando a taxa de *Weighted Average Cost of Capital* (WACC), que é de 8,62% (AGEPAR, 2017).

⁵ MARIN, C.A. Comunicação Pessoal, USEG, SANEPAR, 2017.

TABELA 21 - CUSTOS ENVOLVIDOS PARA O TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DO LODO E BIOGÁS.

CUSTOS ENVOLVIDOS			
Cenário base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Lodo biológico			
Aquisição da centrífuga (obra, bombas, preparador polímero)			
Energia (demanda e consumida)			
Consumo polímero			
Funcionários			
Construção barracão	Aquisição do secador rotativo	Aquisição do secador rotativo	Aquisição do secador rotativo
Mistura cal+lodo	Instalação	Instalação	Instalação
Cal	Obra civil	Obra civil	Obra civil
Transporte destino	Energia	Energia	Energia
Lancer	Nonox	Nonox	Nonox
Análises laboratoriais	Funcionários	Funcionários	Funcionários
Apoio agrônômico	Transporte	Transporte	Transporte
Manutenção	Lancer	Lancer	Custo do aterro
	Análises laboratoriais	Análises laboratoriais	
	Apoio agrônômico	Apoio agrônômico	
	Manutenção	Manutenção	
Biogás			
Aquisição do queimador			

Os custos de aquisição incluíram as etapas de fornecimento, obra civil e instalação.

$$DA = DF + DIN + DOC \quad (3)$$

Em que:

DA = Despesa com aquisição

DF = Despesas com fornecimento

DIN = Despesas com instalação

DPP = Despesas com obra civil

Os valores de aquisição e instalação foram levantados com o fornecedor do secador rotativo (ALBRECHT, 2014; ALBRECHT, 2017).

Os custos de operação incluíram basicamente os custos do pessoal, consumo de energia elétrica e produtos químicos (SANCHES, 2009).

$$DOP = DEE + DPQ + DPP \quad (4)$$

Em que:

DOP = Despesas com operação (R\$/ano)

DEE = Despesas com energia elétrica (R\$/ano)

DPQ = Despesas com produto químico (R\$/ano)

DPP = Despesas com pessoal (R\$/ano)

As despesas com energia elétrica referem-se à consumida pelo tratamento e a de demanda. A energia de demanda se refere à potência instalada na planta de tratamento.

$$DEC = POT \times NH \times CEC \times 365 \quad (5)$$

Em que:

DEC = Despesa com energia elétrica consumida (R\$/ano)

POT = Potência consumida em equipamentos (kW)

NH = Número de horas de operação (h)

CEC = Custo de energia elétrica de consumo (R\$/kWh)

365 = Número de dias no ano

$$DED = POT \times CED \quad (6)$$

Em que:

DED = Despesa com energia elétrica demanda (R\$/ano)

POT = Potência consumida em equipamentos (kW)

CED = Custo de energia elétrica de demanda (R\$/kWh)

Os custos da energia elétrica consumida e demanda foi levantado na Fatura da Companhia, referente ao mês de Junho de 2017.

Foram levantados também os custos com as despesas da utilização de produtos químicos no processo e as despesas com o pessoal, que está vinculado direta ou indiretamente à operação de tratamento do lodo biológico.

$$DPQ = VPROD \times TPQ \quad (7)$$

Em que:

DPQ = Despesa com produtos químicos (R\$/ano)

VPROD = Volume utilizado (m³/ano)

TPQ = Custo médio produtos químicos (R\$/m³)

$$DPP = NEMP \times TPP \quad (8)$$

Em que:

DPP = Despesas com pessoal (R\$/ano)

NEMP = Números de funcionários no ano

TPP = Custo anual por funcionários (R\$/funcionário)

O custo de manutenção para o cenário base foi levantado junto com a SANEPAR⁶ referente ao ano de 2016. Para os demais cenários, foi considerado um valor de 2% do valor de investimento do secador rotativo (ONG et al., 2012).

Para cada alternativa de processo analisada foram calculados o Custo Total (CT). O Custo Total é a soma de todos custos de aquisição, operação e manutenção anual. Foi considerado também o custo da destinação final do lodo biológico, considerando o custo de transporte e combustíveis utilizados.

Após o levantamento anual dos custos, os valores foram convertidos para a unidade funcional, sendo o tratamento e gerenciamento dos subprodutos ao tratar 1 m³ de efluente.

3.5 AVALIAÇÃO DAS TRÊS DIMENSÕES DA SUSTENTABILIDADE

Uma vez obtidos os resultados referentes aos impactos ambiental, social e econômico, a próxima etapa do trabalho foi converter estes dados em um único indicador de sustentabilidade.

Para a integração das 3 dimensões utilizou-se o indicador de sustentabilidade *Dashboard of Sustainability* (DoS), introduzido por Traverso e Finkbeiner (2009) (UNEP, 2011).

O modelo pondera todos os indicadores para uma mesma escala, representando os mesmos em forma matemática ou gráfica. A partir disso é determinada uma pontuação entre 0 e 1000 pontos, sendo zero pontos para o pior caso possível e 1000 pontos para o melhor. Baseado nesta determinação calcula-se os casos intermediários utilizando uma interpolação linear entre estas duas delimitações determinadas, conforme apresentado na equação (9).

⁶ MARIN, C.A. Comunicação Pessoal, USEG, SANEPAR, 2017.

$$(escore\ DoS)_i = 1000 \times \frac{[(valor)_i - (valor)_0]}{[(valor)_{1000} - (valor)_0]} \quad (9)$$

Em que:

(escore DoS) = o escore DoS atribuído para o indicador em um contexto i;

(valor)_i = valor do indicador para o contexto i (intermediário);

(valor)₀ = o indicador de pior valor entre todos os contextos;

(valor)₁₀₀₀ = o indicador de melhor valor entre todos os contextos.

Este indicador trabalha com uma escala de 7 a 9 cores que correspondem aos diferentes níveis de sustentabilidade. Esta escala de cores vai do verde escuro (excelente) até o vermelho escuro (crítico) (FIGURA 31). Na apresentação final, é visualizado um anel, onde os 3 externos apresentam os indicadores das dimensões (ambiental, social e econômica) em uma única medida e o círculo central apresenta o índice final de sustentabilidade (IS ou IDS).

FIGURA 31 - ESCALA DE CORES UTILIZADAS NO SOFTWARE DoS

Escala de Cores	Grau de Sustentabilidade	Intervalo de pontos
	Excelente	889 - 1000
	Muito bom	778 - 888
	Bom	667 - 777
	Razoável	556 - 666
	Médio	445 - 555
	Ruim	334 - 444
	Muito ruim	223 - 333
	Atenção severa	111 - 222
	Estado crítico	0 - 110
	Sem dados	

Para este trabalho, utilizou-se as dimensões ambientais, sociais e econômicas, totalizando 23 indicadores, sendo 8 ambientais, 10 sociais e 5 econômicos (TABELA 22).

TABELA 22 - INDICADORES CONSIDERADOS NESSE ESTUDO PARA A AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE.

Ambientais			Sociais			Econômicos		
Mudança climática			Salários	pagos	aos	Custo	etapa	desaguamento
			trabalhadores			(Centrífuga)		
Depleção	de	ozônio	Nível de ruído (Trabalhadores)			Custo sistema de higienização		
estratosférico								
Formação de ozônio			Utilização de produto químico perigoso			Custo destinação do lodo		
Acidificação terrestre			Emissão de odor (H ₂ S e NH ₃) (Trabalhadores)			Custo destinação do biogás		
Eutrofização aquática			Riscos biológicos (bactérias, fungos, vírus)			Custo manutenção		
Ecotoxicidade terrestre			Teor de N e P no lodo					
Ecotoxicidade água doce			Valores de patógenos presentes no lodo					
Toxicidade	humana,	não	Nível de ruído (Comunidade e Sociedade)					
cancerígena								
			Emissão de odor (Comunidade e Sociedade)					
			Capacidade de geração de emprego					

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA DA FASE OPERACIONAL DO TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO BIOLÓGICO E BIOGÁS

4.1.1 Inventários Ambientais ⁷

A TABELA 23 apresenta os resultados dos inventários ambientais do tratamento e disposição agrícola do lodo biológico e biogás, referentes ao cenário base e cenários 1, 2 e 3.

TABELA 23 - INVENTÁRIOS AMBIENTAIS DO CENÁRIO BASE, CENÁRIO 1, CENÁRIO 2 E CENÁRIO 3.

		(continua)			
Processos		Valores (por cenário)			
		CB	C1	C2	C3
Desaguamento	Entradas				
	Lodo (kg)	2,51	2,51	2,51	2,51
	Polímero (0.3%) (kg)	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019
	Transporte (tkm)	0,000177	0,000177	0,000177	0,000177
	Eletricidade (kWh)	0,006047	0,006047	0,006047	0,006047
Higienização	Lodo desaguado (kg)	0,306	0,306	0,306	0,306
	Cal (kg)	0,033077	-	-	-
	Energia (biogás) (kWh)	-	0,336	0,115	0,115
	Energia térmica (Lodo) (kWh)	-	-	0,221254	0,221254
	Eletricidade (kWh)	-	0,036454	0,036454	0,036454
	Transporte (Cal) tkm	0,003374	-	-	-
	Combustível (L)	0,001123	-	-	-
	Saídas				
	Água (kg)	0,1337	0,229851	0,233487	0,233487
	NH ₃ (kg)	0,001164	-	-	-
	CO ₂ (kg)	0,001882	-	-	-
	CO (kg)	3,59x10 ⁻⁰⁶	0,001775	0,0004	0,0004
	NO _x (kg)	7,78x10 ⁻⁰⁶	2,83x10 ⁻⁰⁵	0,000277	0,000277
	SO _x (kg)	-	3,16x10 ⁻⁰⁵	0,003352	0,003352
	ΣBTEX (kg)	-	-	6,15x10 ⁻⁰⁶	6,15x10 ⁻⁰⁶
	Dioxinas (kg)	-	-	2,34x10 ⁻⁰⁹	2,34x10 ⁻⁰⁹
	Particulados (kg)	7,78E-08	0,000179	0,000492	0,000492
	Efluente (L)	-	0,107635	0,10251	0,10251

⁷ Amaral, K.G.C., Aisse, M.M., Possetti, G.R.C., Prado, M.R., Koga P. Environmental inventory of treatment and final disposal of anaerobic sludge and biogás - case study usage in agricultural. Congreso Interamericano de Cambio Climático, 2016.

TABELA 23 - INVENTÁRIOS AMBIENTAIS DO CENÁRIO BASE, CENÁRIO 1 E CENÁRIO 2.

(conclusão)

Processos		Valores por cenário			
		CB	C1	C2	C3
Destinação	Produtos evitados				
	Ureia (kg)	0,001483	0,000893	0,002298	-
	P ₂ O ₅ (kg)	0,000541	0,00015	0,00019	-
	Cal (kg)	0,043602	-	-	-
	Entradas				
	Lodo higienizado/cinza (kg)	0,205377	0,076362	0,029781	0,029781
	Transporte (tkm)	0,0384	0,014295	0,005575	0,00080
	Combustível (L)	8,22E-05	-	-	-
	Saídas				
	<i>ar</i> NH ₃ (kg)	0,000342	0,000206	0,000585	-
<i>subterrânea</i>	N ₂ O (kg)	1,53x10 ⁻⁰⁵	9,14x10 ⁻⁰⁶	2,24x10 ⁻⁰⁵	-
	NO _x (kg)	3,78x10 ⁻⁰⁶	2,13x10 ⁻⁰⁶	4,79x10 ⁻⁰⁶	-
	CO (kg)	2,63x10 ⁻⁰⁷	9,76x10 ⁻⁰⁸	3,81x10 ⁻⁰⁸	-
	Particulates (kg)	5,69x10 ⁻⁰⁹	2,12x10 ⁻⁰⁶	8,26x10 ⁻⁰⁷	-
	<i>Água</i> NO ₃ (kg)	4,61x10 ⁻⁰⁵	1,99x10 ⁻⁰⁵	6,86x10 ⁻⁰⁵	-
	PO ₄ (kg)	3,56x10 ⁻⁰⁷	6,76x10 ⁻⁰⁸	4,91x10 ⁻⁰⁷	-
	<i>Água</i> PO ₄ (kg)	2,34x10 ⁻⁰⁶	5,18x10 ⁻⁰⁷	1,75x10 ⁻¹⁶	-
	<i>superficial</i>				
	<i>água</i> Cd (kg)	1,82x10 ⁻¹⁰	0	0	-
	Cu (kg)	1,64x10 ⁻⁰⁸	2,70x10 ⁻⁰⁹	1,16x10 ⁻⁰⁸	-
<i>solo</i>	Zn (kg)	1,46x10 ⁻⁰⁷	2,43x10 ⁻⁰⁸	7,67x10 ⁻⁰⁹	-
	Pb (kg)	2,36x10 ⁻⁰⁹	4,32x10 ⁻¹⁰	0	-
	Ni (kg)	0	0	0	-
	Cr (kg)	9,47x10 ⁻⁰⁸	0	1,68x10 ⁻⁰⁸	-
	Hg (kg)	5,93x10 ⁻¹²	0	0	-
	Cd (kg)	1,60x10 ⁻⁰⁹	0	0	-
	Cu (kg)	1,45x10 ⁻⁰⁶	4,49x10 ⁻⁰⁹	1,92x10 ⁻⁰⁸	-
	Zn (kg)	1,1x10 ⁻⁰⁵	1,09x10 ⁻⁰⁸	3,43x10 ⁻⁰⁹	-
	Pb (kg)	4,85x10 ⁻⁰⁷	4,17x10 ⁻⁰⁹	0	-
	Ni (kg)	3,54x10 ⁻⁰⁷	5,11x10 ⁻⁰⁹	7,67x10 ⁻⁰⁹	-
Biogás (captado UASB)	Cr (kg)	4,85x10 ⁻⁰⁷	0	5,68x10 ⁻⁰⁹	-
	Hg (kg)	4,19x10 ⁻⁰⁸	0	0	-
	Entradas				
	Biogás (Nm ³)	0,052163	0,052163	0,052163	0,052163
	Saídas				
	CO ₂ (kg)	0,04591	0,07084	0,07084	0,07084
	H ₂ (kg)	0,00014	0,00014	0,00014	0,00014
	SO ₂ (kg)	0,00023	0,00019	0,00019	0,00019
	CH ₄ (kg)	0,01297	0,00389	0,00389	0,00389
	N ₂ (kg)	0,01045	0,01045	0,01045	0,01045
Biogás dissolvido no efluente	Calor (MJ)	0,64867	1,103	1,103	1,103
	Entradas				
	Efluente (m ³)	1	1	1	1
	Saídas				
	CH ₄ (kg)	0,0085	0,0085	0,0085	0,0085

NOTA: Cenário base (CB): Lodo sendo desaguado na centrífuga, submetido à EAP e destinado na agricultura. O biogás é queimado em *flare* aberto. Cenário 1 (C1): Biogás é utilizado como fonte de calor para a secagem do lodo biológico em secador rotativo. O lodo seco é destinado na agricultura. Cenário 2 (C2): É realizada a combustão do lodo para a utilização do calor na secagem do lodo desaguado. As cinzas são destinadas na agricultura. Cenário 3 (C3): Semelhante ao cenário 2, sendo as cinzas destinadas no aterro sanitário.

A etapa de higienização por EAP (cenário base) gera a maior quantidade de lodo higienizado a ser destinado, porém é responsável pelas menores emissões de CO ($3,59 \times 10^{-06}$ kg) e NO_x ($7,78 \times 10^{-06}$ kg). O secador rotativo, utilizando o calor do biogás (cenário 1), apresenta a maior emissão de CO (0,0018 kg) e o secador rotativo, utilizando o calor da combustão do lodo (cenários 2 e 3), apresenta a maior emissão de NO_x (0,00028 kg). Os cenários utilizando-se o calor da combustão do lodo (cenário 2 e 3) geram os menores volumes de lodo a ser destinado (0,0299 kg), apresentando os menores valores para transporte do lodo: 0,0055 e 0,0008 tkm, respectivamente.

Com relação à etapa de destinação final, a disposição agrícola do lodo higienizado por EAP (cenário base) apresenta as maiores quantidades de produtos evitados de superfosfato (0,00054 kg) e calcário (0,0436 kg), porém é responsável pelas maiores emissões de metais na água e solo. O cenário utilizando o calor de combustão do lodo (cenário 2) apresenta os maiores valores de emissões atmosféricas de NH₃ (0,00058 kg) e N₂O ($2,24 \times 10^{-5}$ kg).

As emissões referentes à disposição das cinzas no aterro (cenário 3) não constam na Tabela 23 por ter sido utilizado neste estudo o aterro do banco de dados do Ecoinvent v3 (*Municipal solid waste {RoW} | treatment of, sanitary landfill | Alloc Def, U*).

Cabe salientar que foram utilizados, nos 4 cenários, lodo de diferentes origens, sendo o cenário base proveniente da ETE estudada. Nos cenários 1 e 2 os resultados referem-se ao piloto instalado em uma ETE anaeróbia. No cenário 3 foi utilizado o lodo da ETE estudada, sendo a combustão realizada em laboratório.

4.1.2 Avaliação dos Impactos Ambientais^{8,9}

A TABELA 24 apresenta os valores da contribuição do impacto ambiental, em cada etapa de tratamento e destinação final do lodo, para cada cenário do estudo.

⁸ Amaral, K.G.C., Aisse, M.M., Possetti, G.R.C., Prado, M.R. Environmental impact assessment of the treatment and disposal of agricultural biological sludge and biogas using life cycle analysis as a tool – case study. Congresso Interamericano de Cambio Climático, 2016.

⁹ Amaral, K.G.C., Aisse, M.M., Possetti, G.R.C., Prado, M.R. Use of life cycle assessment to evaluate environmental impacts associated with the management of sludge and biogas. Water Science and Technology. Aceito para publicação em 19/03/2018.

TABELA 24 - VALORES DE CONTRIBUIÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL EM CADA ETAPA DE TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO E DO BIOGÁS PARA CADA CENÁRIO DO ESTUDO

Categorias		Desagua- mento	Higieniza- ção	Transpor- te	Produto evitado			Destino final	Biogás UASB	- Metano dissolvido	SOMA
					N	P	Calcário				
MC kg de CO ₂ eq.	CB	0,0054	0,0381	0,0161	-0,0085	-0,0011	-0,0001	0,0060	0,4414	0,2890	0,7864
	C1	0,0054	0,0101	0,0060	-0,0051	-0,0003	0	0,0027	0,1330	0,2890	0,4409
	C2	0,0054	0,0096	0,0023	-0,0131	-0,0004	0	0,0067	0,1329	0,2890	0,4325
	C3	0,0054	0,0096	0,0003	0	0	0	0,0225	0,1329	0,2888	0,4596
DOE kg de CFC-11eq.	CB	4,97x10 ⁻⁰⁹	6,61x10 ⁻⁰⁹	4,76x10 ⁻⁰⁹	-1,56E-07	-6,1x10 ⁻¹⁰	-3,34x10 ⁻¹⁰	2,20 x10 ⁻⁰⁷	0	0	7,94x10 ⁻⁰⁸
	C1	4,97x10 ⁻⁰⁹	2,57x10 ⁻⁰⁸	1,77x10 ⁻⁰⁹	-9,40x10 ⁻⁸	-1,7x10 ⁻¹⁰	0	1,01x10 ⁻⁰⁷	0	0	3,88x10 ⁻⁰⁸
	C2	4,97x10 ⁻⁰⁹	2,43x10 ⁻⁰⁸	6,90x10 ⁻¹⁰	-2,42x10 ⁻⁷	-2,1x10 ⁻¹⁰	0	2,46x10 ⁻⁰⁷	0	0	3,43x10 ⁻⁰⁸
	C3	4,97x10 ⁻⁰⁹	2,43x10 ⁻⁰⁸	9,96x10 ⁻¹¹	0	0	0	1,48x10 ⁻⁰⁹	0	0	3,0x10 ⁻⁰⁸
FO-ET (kg NOx eq)	CB	4,03x10 ⁻⁰⁶	4,47x10 ⁻⁰⁵	1,07x10 ⁻⁰⁴	-1,39x10 ⁻⁰⁵	-3,67x10 ⁻⁰⁶	-2,30x10 ⁻⁰⁶	3,94x10 ⁻⁰⁶	0	0	1,39x10 ⁻⁰⁴
	C1	4,03x10 ⁻⁰⁶	3,94x10 ⁻⁰⁵	3,96x10 ⁻⁰⁵	-8,38x10 ⁻⁰⁶	-1,02x10 ⁻⁰⁶	0	2,19x10 ⁻⁰⁶	0	0	7,58x10 ⁻⁰⁵
	C2	4,03x10 ⁻⁰⁶	2,87x10 ⁻⁰⁴	1,54x10 ⁻⁰⁵	-2,16x10 ⁻⁰⁵	-1,29x10 ⁻⁰⁶	0	4,81x10 ⁻⁰⁶	0	0	2,89x10 ⁻⁰⁴
	C3	4,03x10 ⁻⁰⁶	2,87x10 ⁻⁰⁴	2,23x10 ⁻⁰⁶	0	0	0	2,59x10 ⁻⁰⁶	0	0	2,96x10 ⁻⁰⁴
AT kg de SO ₂	CB	1,65x10 ⁻⁰⁵	2,33x10 ⁻⁰³	5,53x10 ⁻⁰⁵	-3,12x10 ⁻⁰⁵	-1,17x10 ⁻⁰⁵	-1,43x10 ⁻⁰⁶	6,68x10 ⁻⁰⁴	2,26x10 ⁻⁰⁴	0	3,26x10 ⁻⁰³
	C1	1,65x10 ⁻⁰⁵	6,71x10 ⁻⁰⁵	2,06x10 ⁻⁰⁵	-1,88x10 ⁻⁰⁵	-3,26x10 ⁻⁰⁶	0	4,04x10 ⁻⁰⁴	1,91x10 ⁻⁰⁴	0	6,78x10 ⁻⁰⁴
	C2	1,65x10 ⁻⁰⁵	4,58x10 ⁻⁰³	8,02x10 ⁻⁰⁶	-4,84x10 ⁻⁰⁵	-4,12x10 ⁻⁰⁶	0	1,15x10 ⁻⁰³	1,91x10 ⁻⁰⁴	0	5,89x10 ⁻⁰³
	C3	1,65x10 ⁻⁰⁵	4,58x10 ⁻⁰³	1,16x10 ⁻⁰⁶	0	0	0	3,17x10 ⁻⁰⁶	1,91x10 ⁻⁰⁴	0	4,79x10 ⁻⁰³
EUT-AD kg de Peq.	CB	1,33E-05	1,04x10 ⁻⁰⁷	1,89x10 ⁻⁰⁸	-2,47x10 ⁻⁰⁸	-8,91x10 ⁻⁰⁷	-9,93x10 ⁻¹⁰	8,89x10 ⁻⁰⁷	0	0	1,34x10 ⁻⁰⁵
	C1	1,33E-05	8,46x10 ⁻⁰⁷	7,02x10 ⁻⁰⁹	-1,49x10 ⁻⁰⁸	-2,48x10 ⁻⁰⁷	0	1,93x10 ⁻⁰⁷	0	0	1,41x10 ⁻⁰⁵
	C2	1,33E-05	8,04x10 ⁻⁰⁷	2,74x10 ⁻⁰⁹	-3,82x10 ⁻⁰⁸	-3,12x10 ⁻⁰⁷	0	1,62x10 ⁻⁰⁷	0	0	1,39x10 ⁻⁰⁵
	C3	1,33E-05	8,04x10 ⁻⁰⁷	3,95x10 ⁻¹⁰	0	0	0	1,55x10 ⁻⁰⁷	0	0	1,43x10 ⁻⁰⁵
ET kg de 1,4 DBeq.	CB	8,84E-07	1,79x10 ⁻⁰⁵	3,98x10 ⁻⁰⁵	-5,28x10 ⁻⁰⁶	-3,44x10 ⁻⁰⁷	-2,78x10 ⁻⁰⁸	1,39x10 ⁻⁰⁸	0	0	5,3x10 ⁻⁰⁵
	C1	8,84E-07	2,00x10 ⁻⁰⁶	1,48x10 ⁻⁰⁵	-3,18x10 ⁻⁰⁶	-9,55x10 ⁻⁰⁸	0	5,16x10 ⁻⁰⁹	0	0	1,44x10 ⁻⁰⁵
	C2	8,83E-07	1,90x10 ⁻⁰⁶	5,77x10 ⁻⁰⁶	-8,18x10 ⁻⁰⁶	-1,21x10 ⁻⁰⁷	0	2,01x10 ⁻⁰⁹	0	0	2,47x10 ⁻⁰⁷
	C3	8,83E-07	1,90x10 ⁻⁰⁶	8,32x10 ⁻⁰⁷	0	0	0	8,30x10 ⁻⁰⁸	0	0	3,69x10 ⁻⁰⁶
EAD kg de 1,4 DBeq.	CB	1,36E-06	8,42x10 ⁻⁰⁶	2,66x10 ⁻⁰⁵	-3,62x10 ⁻⁰⁶	-5,93x10 ⁻⁰⁶	-3,74x10 ⁻⁰⁸	6,98x10 ⁻⁰⁵	0	0	9,65x10 ⁻⁰⁵
	C1	1,36E-06	3,12x10 ⁻⁰⁶	9,87x10 ⁻⁰⁶	-2,18x10 ⁻⁰⁶	-1,65x10 ⁻⁰⁶	0	5,66x10 ⁻⁰⁶	0	0	1,62x10 ⁻⁰⁵
	C2	1,36E-06	2,95x10 ⁻⁰⁶	3,85x10 ⁻⁰⁶	-5,61x10 ⁻⁰⁶	-2,08x10 ⁻⁰⁶	0	3,59x10 ⁻⁰⁶	0	0	4,06x10 ⁻⁰⁶
	C3	1,36E-06	2,95x10 ⁻⁰⁶	5,55x10 ⁻⁰⁷	0	0	0	6,29x10 ⁻⁰⁶	0	0	1,12x10 ⁻⁰⁵
TH kg de 1,4 DBeq.	CB	0,0429	0,0461	0,0662	-0,0077	-0,0101	-8,98x10 ⁻⁰⁵	14,2108	0	0	14,3482
	C1	0,0429	0,0217	0,0246	-0,0046	-0,0028	0	0,0211	0	0	0,1029
	C2	0,0429	0,0205	0,0096	-0,0119	-0,0035	0	0,0066	0	0	0,0642
	C3	0,0429	0,0205	0,0014	0	0	0	0,0067	0	0	0,0715

Nota : MC=Mudanças climáticas; DOE=Depleção do ozônio estratosférico; FO-ET=Formação de ozônio, ecossistema terrestre; AT=Acidificação terrestre EUT – AD=Eutrofização água doce; ET=Ecotoxicidade terrestre; EAD=Ecotoxicidade água doce; TH=Toxicidade humana.

Para a categoria de mudanças climáticas, o maior impacto foi o cenário base (0,7864 kg de CO₂eq), utilizando-se a EAP para a higienização do lodo. As etapas que contribuíram mais para esta categoria foram a destruição do biogás em queimadores abertos (56,13%) e a emissão de metano dissolvido no efluente (36,75%) (FIGURA 32). Para essa categoria, o cenário menos impactante é o cenário 2 (0,4325 de CO₂eq), onde é utilizado o calor proveniente da combustão do lodo para secagem e higienização. Nos cenários propostos, o metano dissolvido apresenta uma contribuição acima de 60% para esta categoria. Todos os cenários apresentaram melhoria em relação ao cenário base nessa categoria, sendo uma diminuição maior de 40% (FIGURA 33). A eficiência do secador térmico pode ser melhorada, porque o mercado tem outras opções, como secadores de esteira. No entanto, neste estudo de caso, houve excesso de calor a partir de biogás e lodo seco. De certa forma, os resultados da ACV são semelhantes. Além disso, o secador rotativo é uma solução adotada para as condições regionais, que foi avaliada em escala piloto. O impacto ambiental do cenário base poderia ser reduzido usando um queimador de alta eficiência (98%) que já está disponível no mercado. Ao utilizar este equipamento, o impacto nesta categoria reduz em 85%.

Na categoria de formação de ozônio (ecossistemas terrestres), os cenários 2 (2,89x10⁻⁰⁴ kg NO_x eq) e 3 (2,96x10⁻⁰⁴ kg NO_x eq) têm um alto potencial de impacto em comparação com o cenário base (1,39x10⁻⁰⁴ kg NO_x eq), 107% e 112%, respectivamente. Esses cenários foram maiores devido ao aumento das emissões de NO_x durante a combustão de lodo; no Cenário 2, essa etapa foi responsável por 99% e 97% no Cenário 3.

O cenário 1 (6,78x10⁻⁰⁴ kg SO₂ eq) mostrou uma redução de 79% no impacto ambiental potencial para a categoria de acidificação terrestre, em comparação com o cenário base (3,26x10⁻⁰³ kg SO₂ eq). A higienização do lodo é a etapa que mais contribui para essa categoria. No cenário base, essa etapa foi responsável por 72% do impacto total. As emissões de NH₃ durante o processo de calagem de lodo tiveram o maior impacto nesta categoria, representando 70% do impacto total. Nos cenários 2 e 3, a combustão de lodo representou 78% e 95% do valor total do impacto, respectivamente. Os fluxos elementares contribuintes foram as emissões de nitrogênio e óxido de enxofre da combustão, com as emissões de SO_x representando 57% do impacto ambiental para essa categoria no Cenário 2 e 70% no Cenário 3.

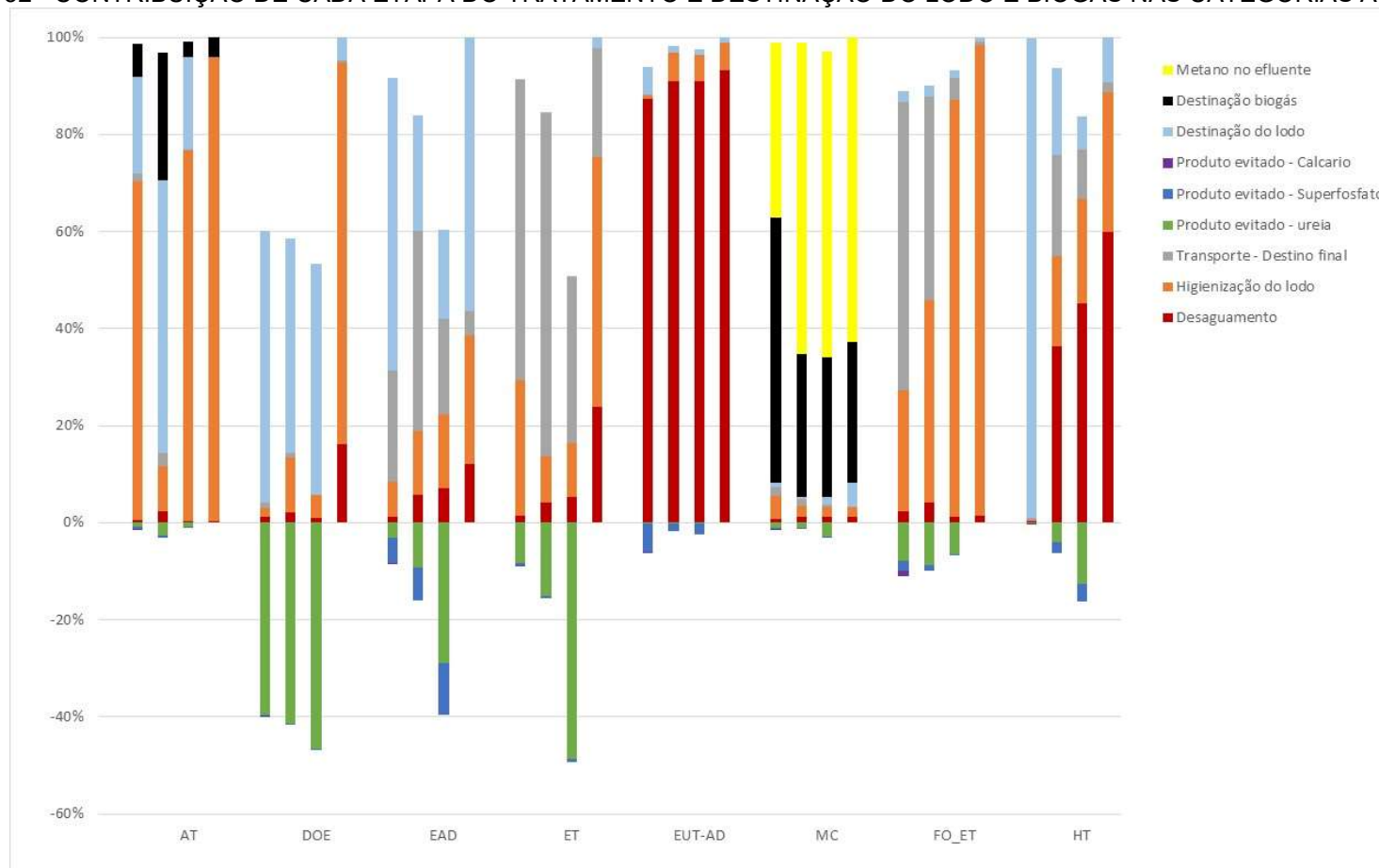
Para a categoria de ecotoxicidade terrestre, todos os cenários apresentaram uma melhoria em relação ao cenário base ($5,3 \times 10^{-5}$ kg de 1,4 DBeq.) (FIGURA 33). A etapa que mais contribuiu para essa categoria no cenário base foi o transporte do lodo até seu destino final, devido às emissões de cobre resultantes do desgaste dos freios (75%). No cenário base, esta foi a maior contribuição, devido ao maior volume de lodo transportado para o descarte final.

Todos os cenários demonstraram melhoria em relação ao cenário base (14,348 kg de 1,4DBeq) para toxicidade humana não-carcinogênica, sendo uma redução de 99%. No cenário base, o uso agrícola fez a contribuição mais significativa (99%), com as emissões de zinco no solo representando 98%. O zinco teve uma contribuição significativa nessa etapa em todos os cenários avaliados. O secador rotativo diminui a concentração de zinco em 46%.

A partir da análise de incerteza, utilizando-se a matriz pedigree através da simulação Monte Carlo, observou-se que não existem diferenças estatisticamente significativas entre os cenários para as categorias depleção do ozônio estratosférico (DOP), eutrofização de água doce (EUT-AD) e ecotoxicidade de água doce (EAD) (FIGURA 33), embora o cenário base contribua para a emissão de N_2O na agricultura, importante fluxo elementar para a categoria de depleção do ozônio estratosférico (277%). Para a categoria de ecotoxicidade água doce, o fluxo elementar contribuinte no cenário base foi a emissão de zinco no solo e água na etapa de destino final do lodo biológico (72%) (FIGURA 32).

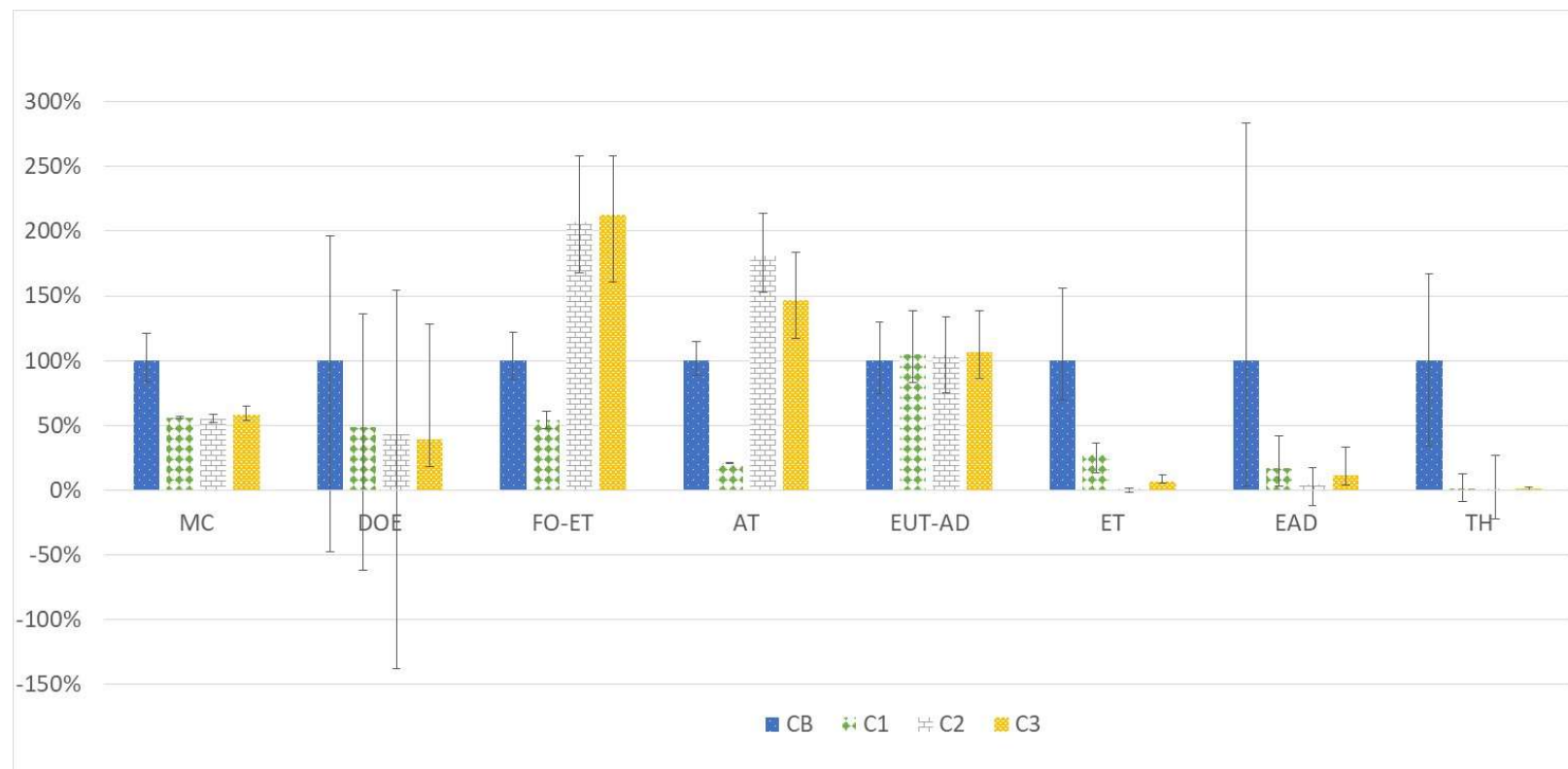
Em geral, o cenário base, no qual o lodo é direcionado ao uso agrícola e o biogás é direcionado à queimadores abertos, teve o maior impacto nas categorias: mudanças climáticas, ecotoxicidade terrestre e toxicidade humana não carcinogênica. O cenário 1, que utilizou o manejo integrado de lodo e biogás, não teve o maior impacto ambiental em nenhuma das categorias avaliadas. O uso de biogás para a secagem do lodo neste cenário reduziu os impactos ambientais para mudanças climáticas (44%), formação de ozônio (45%), acidificação terrestre (79%), ecotoxicidade terrestre (72%) e toxicidade humana não carcinogênica (83%). Deve-se ressaltar que a ACV não é uma ferramenta capaz de avaliar qual processo é mais eficiente, pois não mede os impactos ambientais reais do processo, mas calcula potenciais impactos. Os resultados também podem variar de acordo com os métodos de avaliação ou dados de base utilizados.

FIGURA 32 - CONTRIBUIÇÃO DE CADA ETAPA DO TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DO LODO E BIOGÁS NAS CATEGORIAS AVALIADAS.



Legenda: Mudanças climáticas – MC (kg de CO₂eq.); Depleção do ozônio estratosférico - DOE (kg de CFC-11eq.); Ecotoxicidade água doce - EAD (kg de 1,4 DBeq.); Ecotoxicidade terrestre - ET (kg de 1,4-DB eq.; Eutrofização de água doce - EUT - AD (kg de Peq.); Acidificação terrestre – AT (kg SO₂ eq);Toxicidade humana - TH (kg de 1,4 DBeq.); Oxidantes fotoquímicos – ecossistemas terrestre - FO-ET (kg NO_x eq).

FIGURA 33 – PORCENTAGEM COMPARATIVA ENTRE O CENÁRIO BASE E OUTROS CENÁRIOS DE TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DO LODO BIOLÓGICO E BIOGÁS.



Legenda: Mudanças climáticas – MC (kg de CO₂eq.); Depleção do ozônio estratosférico - DOE (kg de CFC-11eq.); Ecotoxicidade água doce - EAD (kg de 1,4 DBeq.); Ecotoxicidade terrestre - ET (kg de 1,4-DB eq.; Eutrofização de água doce - EUT - AD (kg de Peq.); Acidificação terrestre – AT (kg SO₂ eq);Toxicidade humana - TH (kg de 1,4 DBeq.); Oxidantes fotoquímicos – ecossistemas terrestre - FO-ET (kg NO_x eq).

4.2 AVALIAÇÃO SOCIAL DA FASE OPERACIONAL DO TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO BIOLÓGICO E BIOGÁS¹⁰

Foram consideradas as seguintes categorias de partes interessadas: Trabalhadores, Saúde e Segurança, Consumidores e Comunidade Local e Sociedade, cujos resultados da avaliação são descritos a seguir.

4.2.1 TRABALHADORES

4.2.1.1 Faixa salarial

Indicador: Valores dos salários pagos aos trabalhadores

Cenário base

O requisito básico para a subcategoria faixa salarial é o salário mínimo regional (R\$ 1.234,20), para o grupo correspondente ao cargo de operador de estação de tratamento de efluentes (código 8623-05). O desempenho para essa subcategoria foi caracterizado como excelente (4), visto que o salário dos operadores (R\$ 1.620,26) está acima do mínimo regional e dentro do mínimo requerido para sobrevivência familiar, de acordo com WICARE (2016).

Cenários 1, 2 e 3

Para os cenários 1, 2 e 3, que utilizam o secador térmico rotativo, o desempenho também foi caracterizado como excelente (4), devido a uma maior exigência de qualificação da mão de obra ao utilizar o secador.

4.2.1.2 Saúde e Segurança

Para essa subcategoria, consideraram-se os seguintes indicadores: nível de ruído ocupacional, utilização de produto químico perigoso, emissões gasosas consideradas prejudiciais aos trabalhadores (CH₄, H₂S e NH₃), riscos biológicos (bactérias, fungos, vírus), emissão de odor.

¹⁰ Amaral, K.G.C., Aisse, M.M., Possetti, G.R.C., Costa, F.J.O.G., Ugaya, C.M.L. Análise de Ciclo de Vida Social inerente ao gerenciamento de lodo e de biogás em uma estação de tratamento anaeróbio de esgoto. Congresso ABES/FENASAM, 2017.

Indicador: Nível de ruído ocupacional

Cenário base

Para o indicador de nível de ruído ocupacional, o requisito básico é o estabelecido pela norma regulamentadora nº 15 (NR, 2014), do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), sendo o valor de 85 dB para uma exposição de 8 horas diária e de 90 dB para uma exposição de 4 horas. De acordo com a dosimetria de ruído realizado com operador da estação apresentou o valor de 74,3 dB e dose de 0,23. Atribuiu-se para este indicador o valor de (3), cumprimento ao requisito.

Cenários 1, 2 e 3

Para os cenários propostos, foram utilizados os valores de medição realizados por Rietow (2013)¹¹, medido no sistema piloto instalado. Os valores estão demonstrados na TABELA 25.

TABELA 25 - VALORES DE RUÍDOS DO SECADOR TÉRMICO ROTATIVO

Pontos	Valores (média) (dB)
P1 (painel)	64,4
P2 (queimador)	67,7
P3 (rosca alimentação)	59,3
P4 (tambor)	63,1
P5 (saída da rosca)	59,4
P6 (lavador de gases)	58,5
P7 (frente do tambor- 3m)	60,8
P8 (frente do tambor- 5m)	59,8
P9 (9m do secador)	54,3

Fonte: RIETOW (2013).

De acordo com o apresentado pela TABELA 25, os valores estão de acordo com o estabelecido pela NR 15. O desempenho para este indicador foi de cumprimento ao requisito (3).

¹¹ RIETOW, J.C. Comunicação Pessoal, SANEPAR, 2013.

Indicador: Utilização de produto químico perigosoCenário base

Para o tratamento do lodo biológico é utilizado a cal virgem. A cal virgem não consta na lista de produtos químicos considerados para atividades insalubres na NR 15. No entanto, o *National Institute for Occupational Safety and Health* - NIOSH considera que o limite de IDLH é de 25 mg/m³. Foi considerado para este indicador o valor de (3), cumprimento ao requisito básico.

Cenários 1, 2 e 3

O produto químico utilizado nos cenários é o Nonox, usado para o controle de odor do processo. De acordo com a Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos - FISPQ, o produto não é considerado perigoso. Foi considerado para este indicador o valor de (3), cumprimento ao requisito básico.

4.2.1.4 Emissões gasosas consideradas prejudiciais aos trabalhadores (H₂S e NH₃) / Emissão de odorCenário base

Foi realizada a medição de NH₃ (28 pontos) na ETE e de H₂S (21 pontos). De acordo com a medição realizada, o valor da concentração de NH₃ e H₂S apresentou-se dentro do estabelecido pela NR 15 (FIGURAS 33, 34 e 35). O valor atribuído para este indicador foi de (3), cumprimento ao requisito básico.

Cenários 1, 2 e 3

Nos cenários, onde é realizada a secagem e higienização utilizando o secador, não tem a emissão de NH₃. Como os valores de H₂S foram atribuídos como origem nos reatores, o desempenho para esta categoria foi classificado como cumprimento ao requisito (3).

Indicador: Riscos biológicos (bactérias, fungos, vírus)Cenário base

O indicador riscos biológicos foi classificado como (2) devido à presença de coliformes termotolerantes no lodo biológico, identificados no ano de 2013. As análises de ovos de helmintos, salmonela e vírus, apresentaram-se como ausentes nos 3 anos considerados.

Cenários 1, 2 e 3

Nos cenários utilizando o secador rotativo, o trabalhador não manuseia o lodo biológico. O desempenho para este indicador foi classificado como cumprimento ao requisito (3).

4.2.2 CONSUMIDORES

4.2.2.1 Qualidade do lodo tratado

Indicadores: Teor de N e atendimento aos parâmetros estabelecidos pela legislação

Cenário base

De acordo com as análises realizadas nos anos de 2011, 2012 e 2013 e apresentadas por Bittencourt et al (2014), a qualidade do lodo está de acordo com estabelecido pela CONAMA 375 (BRASIL, 2006). Os teores de N e P no lodo biológico foram de 10,2 e 3,6 g/kg, respectivamente de acordo com análises realizadas em 2014 e 2015. O desempenho para esse indicador foi classificado como aceitável (3).

Cenário 1

De acordo com as análises realizadas em laboratório terceirizado, com o lodo seco proveniente do secador rotativo piloto (ver item 3.2.2.2), a qualidade do lodo está de acordo com estabelecido pela CONAMA 375 (BRASIL, 2006). Os teores de N e P no lodo biológico foram de 5,93 e 0,97 g/kg, respectivamente. O desempenho para esse indicador foi classificado como aceitável (3).

Cenário 2

De acordo com as análises realizadas em laboratório, com as cinzas proveniente da combustão em mufla (ver item 3.2.2.3), a qualidade do lodo está de acordo com estabelecido pela CONAMA 375 (BRASIL, 2006) para uso agrícola. Os

teores de N e P no lodo biológico foram de 34,72 e 20,57 g/kg, respectivamente, e o desempenho para esse indicador foi classificado como excelente (4).

Cenário 3

O desempenho, para o indicador referente ao cenário 3, foi classificado como (0), devido ao não aproveitamento do potencial agronômico das cinzas.

4.2.2.1 Saúde e segurança

Indicador: Valores de patógenos presentes no lodo

Cenário base

Esse indicador foi classificado como (3). Os valores de coliformes no lodo biológico estão de acordo com o estabelecido pelo CONAMA 375 (BRASIL, 2006). Devido à presença de coliformes termotolerantes no lodo biológico e ao risco biológico inerente ao manuseio manual do lodo, esse indicador não se classificou como (4).

Cenário 1

Esse indicador foi classificado como (3). Os valores de coliformes no lodo biológico estão de acordo com o estabelecido pelo CONAMA 375 (BRASIL, 2006). Devido à presença de coliformes termotolerantes no lodo biológico e ao risco biológico inerente ao manuseio manual do lodo, este indicador não se classificou como (4).

Cenário 2

O cenário 2 foi classificado como (4), devido à não presença de coliformes nas cinzas do lodo.

Cenário 3

O desempenho para este indicador referente ao cenário 3, foi classificado como (0), devido ao não aproveitamento do potencial agronômico das cinzas.

4.2.3 COMUNIDADE LOCAL E SOCIEDADE

4.2.3.1 Condições de vida segura e saudável

Indicador: Nível de ruído ambiental

Cenário base

O requisito básico para o nível de ruído é o estabelecido pela lei de zoneamento 10.625 (CURITIBA, 2002), sendo o valor limite de 60 dB no período diurno, 55 dB para o período vespertino e 50 dB para noturno. Os resultados das médias dos valores medidos são apresentados na TABELA 26.

TABELA 26. VALORES DA MEDIÇÃO DE RUÍDOS AMBIENTAIS (dB) na ETE.

Local	Diurno	Vespertino	Noturno
Ponto 1 (Elevatória)	51,48	54,66	50,63
Ponto 2 (Centrífuga)	59,05	61,36	53,32
Ponto 3 (Lagoa)	53,08	58,20	57,25
Ponto 4 (Rodovia)	62,40	59,75	53,58

O ruído referente ao Ponto 2 é ocasionado pela centrífuga. O valor do ruído ambiental referente ao Ponto 4 é atribuído como externo à ETE, devido à rodovia. O desempenho para esse indicador foi classificado como não cumprimento (2).

Cabe salientar que a área habitacional mais próxima do local fica a mais de 300m e tem influência da pressão sonora acentuada de uma avenida com grande circulação de veículos.

Cenários 1, 2 e 3

Conforme demonstrado pela TABELA 25, os valores de ruído ocasionados pelo secador rotativo não são relevantes. Os ruídos provenientes do tratamento do lodo biológico é da centrífuga. O desempenho do indicador para os 3 cenários é semelhante ao cenário base: não cumprimento (2).

Indicador: Odor ambiental

Cenário base

- Ácido sulfídrico (H₂S) – 14 h

A FIGURA 34 apresenta a curva de concentração dos valores de H₂S. Os valores são a média das medições realizadas em 3 dias às 14 hs, empregando-se equipamento Jerome.

Foi realizado o levantamento da direção e velocidade do vento junto ao SIMEPAR nos dias da medição e realizada a rosa dos ventos. O vento predominante foi de leste e a velocidade média foi de 0,39 m/s.

FIGURA 34 – IMAGEM AÉREA DA ETE ESTUDADA COM A CURVA DA CONCENTRAÇÃO DE H₂S - 14 hs



Todos os valores medidos apresentaram-se acima do valor indicado como possível de percepção, de acordo com Park et al. (2014), Schirmer et al. (2007) e descrito no Manual de Procedimentos para Auditoria no Setor de Saneamento Básico (BRASIL, 2002), mas abaixo do valor de odor desagradável na vizinhança.

- Ácido sulfídrico (H_2S) – 19 hs

A FIGURA 35 apresenta a curva de concentração dos valores de H_2S às 19 hs. Para a obtenção preliminar dos valores, foi instalado o medidor Gastec, durante 3 dias, nas canaletas de 3 reatores UASB. Assim, para referenciar os valores do entorno utilizando como base o medidor Jerome, de maior precisão, converteu-se os valores do Gastec, utilizando fatores de conversão, obtidos simultaneamente às 14 hs.

FIGURA 35 - IMAGEM AÉREA DA ETE ESTUDADA COM A CURVA DA CONCENTRAÇÃO DE H_2S - 19 hs



Conforme apresentado na FIGURA 35, todos os valores medidos apresentaram-se como possível de percepção, mas abaixo do valor de odor desagradável na vizinhança no horário de pico da concentração.

- Amônia (NH₃)

Em seres humanos a amônia é altamente irritante para os olhos, pele e mucosas. O seu limite de detecção é de 0,13 ppm e a exposição na concentração de 24 ppm pode causar irritação nasal, a 50 ppm hemeralopia e irritação do sistema respiratório e a 130 ppm há lacrimação e irritação da garganta. Já na concentração de 1720 ppm de amônia provoca tosse e acima de 2500 morte por insuficiência respiratória (NIOSH, 1992).

No dia em que não estava sendo realizada a caleação do lodo, não foi detectado NH₃. Contudo, quando há o processo de caleação detectou-se até 18 ppm.

FIGURA 36 - IMAGEM AÉREA DA ETE ESTUDADA COM A CURVA DA CONCENTRAÇÃO DE NH_3 

Como os valores medidos estão dentro do limite de percepção, mas abaixo do limite de detecção de odor desagradável, foi atribuído o valor de (3), dentro do limite estabelecido.

Cabe salientar que a ETE estudada é dotada de cortina verde, que caracteriza-se pela implantação orientada de indivíduos de duas ou mais espécies arbóreas e arbustivas adaptadas à região e ao solo/substrato local, distribuídos em linhas paralelas, de forma que as plantas de uma linha não fiquem alinhadas com as plantas da linha adjacente, formando barreiras de isolamento (CARNEIRO et al., 2009)

Cenários 1, 2 e 3

O odor proveniente do H_2S é comum aos outros 3 cenários. Foi atribuído o valor de (3), dentro do limite estabelecido.

4.2.3.2 Contribuição para o desenvolvimento econômico

Cenário base

Para essa subcategoria, o indicador é relacionado ao número de empregos gerados para o gerenciamento do lodo e biogás. Devido à baixa mecanização do processo de tratamento do lodo biológico e biogás, o valor considerado para esta categoria foi (4). Como discutido por Padilla-Rivera et al. (2016), o nível baixo de mecanização contribui para o desenvolvimento econômico ao empregar mais mão de obra.

Cenários 1, 2 e 3

Nestes cenários, ao utilizar o secador rotativo para a secagem e a higienização do lodo biológico, aumenta o nível de mecanização. O valor atribuído foi (3).

4.2.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE AVALIAÇÃO SOCIAL

A FIGURA 37 e a TABELA 27 resumam os indicadores tratados neste trabalho.

FIGURA 37 - RESULTADO DOS INDICADORES SOCIAIS REFERENTES AOS 4 CENÁRIOS.

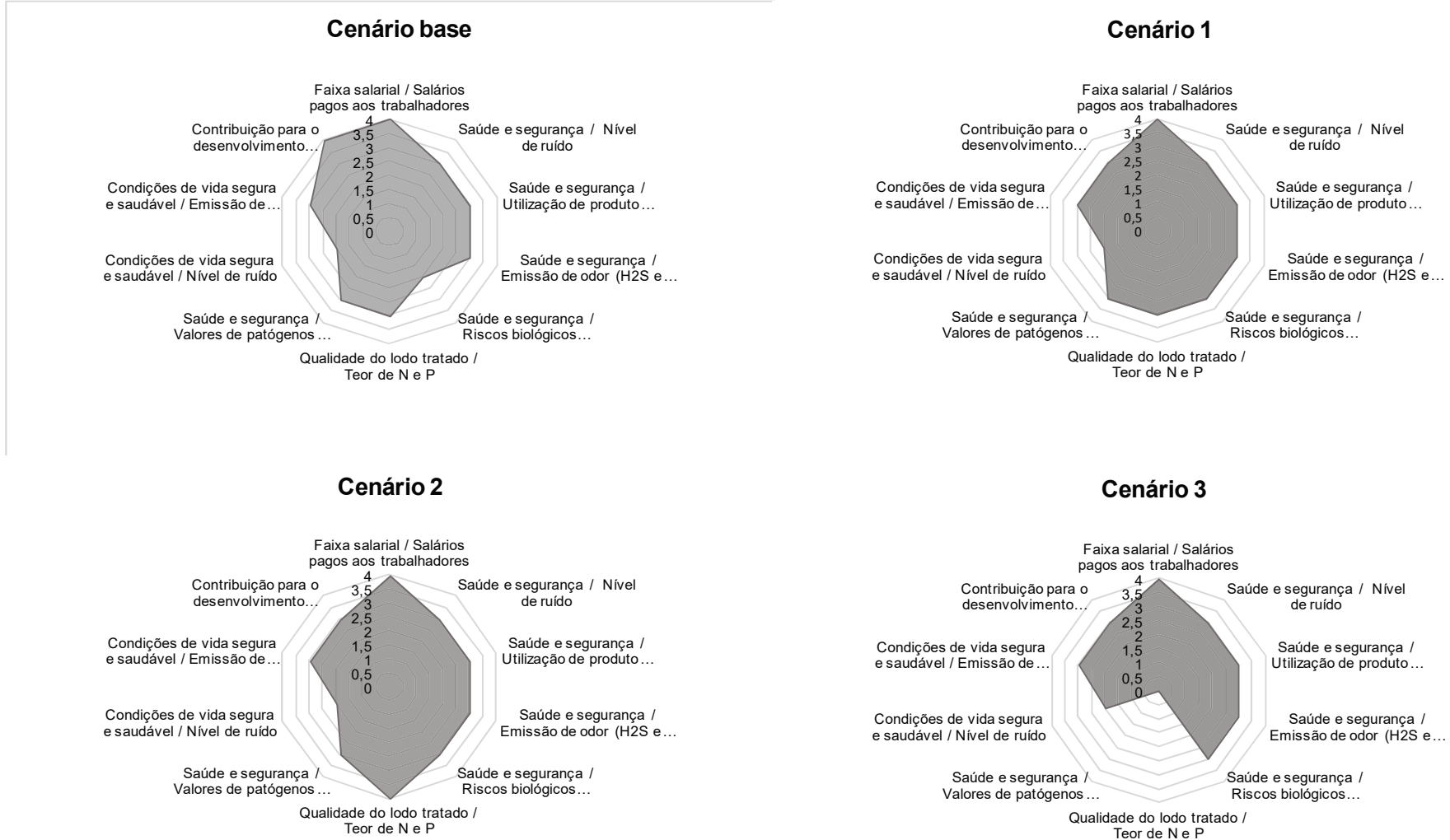


TABELA 27 - RESULTADO DOS INDICADORES SOCIAIS REFERENTES AOS 4 CENÁRIOS.

Trabalhadores		CB	C1	C2	C3
Faixa salarial	Salários pagos aos trabalhadores	4	4	4	4
Saúde e segurança	Nível de ruído	3	3	3	3
	Utilização de produto químico perigoso	3	3	3	3
	Emissão de odor (H ₂ S e NH ₃)	3	3	3	3
	Riscos biológicos (bactérias, fungos, vírus)	2	3	3	3
Consumidores					
Qualidade do lodo tratado	Teor de N e P	3	3	4	0
Saúde e segurança	Valores de patógenos presentes no lodo	3	3	4	0
Comunidade local e sociedade					
Condições de vida segura e saudável	Nível de ruído	2	2	2	2
	Emissão de odor	3	3	3	3
Contribuição para o desenvolvimento econômico	Capacidade de geração de emprego	4	3	3	3

Conforme apresentado, as vantagens da tecnologia de Estabilização Alcalina Prolongada - EAP se referem aos salários dos trabalhadores, capacidade de geração de emprego e ao aproveitamento de nutrientes presentes no lodo biológico (N e P).

Os aspectos que devem ser aprimorados são principalmente a atenuação de ruído ambiental (ocasionado pela centrífuga), o odor (ocasionado ao realizar a EAP no lodo biológico e às emissões fugitivas do H₂S no reator anaeróbio) e o risco biológico no manuseio do lodo.

No cenário 2, onde é realizada a combustão do lodo, a principal vantagem se refere à parte interessada “consumidores”, pelo alto teor de nutrientes presente nas cinzas e ausência de patógenos.

O cenário 3 não obteve desempenho na categoria de consumidores devido ao não aproveitamento do produto final.

Todos os cenários apresentaram uma baixa pontuação com relação ao ruído ambiental, devido ao excedente da medição em alguns pontos.

4.3 ANÁLISE DO CUSTO DE CICLO DE VIDA – ACCV DA FASE OPERACIONAL DO TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO BIOLÓGICO E BIOGÁS

Os custos do tratamento e destinação final do lodo e biogás foram obtidos junto à SANEPAR, referente ao ano de 2016. Os valores detalhados (anual) estão no Apêndice 3. Os valores (em reais) de cada etapa do tratamento e destino final, por

unidade funcional (tratamento e destino final dos subprodutos ao tratar 1 m³ de efluente) são demonstrados na TABELA 28.

Para o cálculo do custo de aquisição da centrífuga (etapa de desaguamento de todos os cenários), utilizou-se o valor apresentado por BARÉA (2013) e atualizado pelo Índice Nacional de Custo da Construção - INCC. Foi considerado uma vida útil do equipamento de 20 anos.

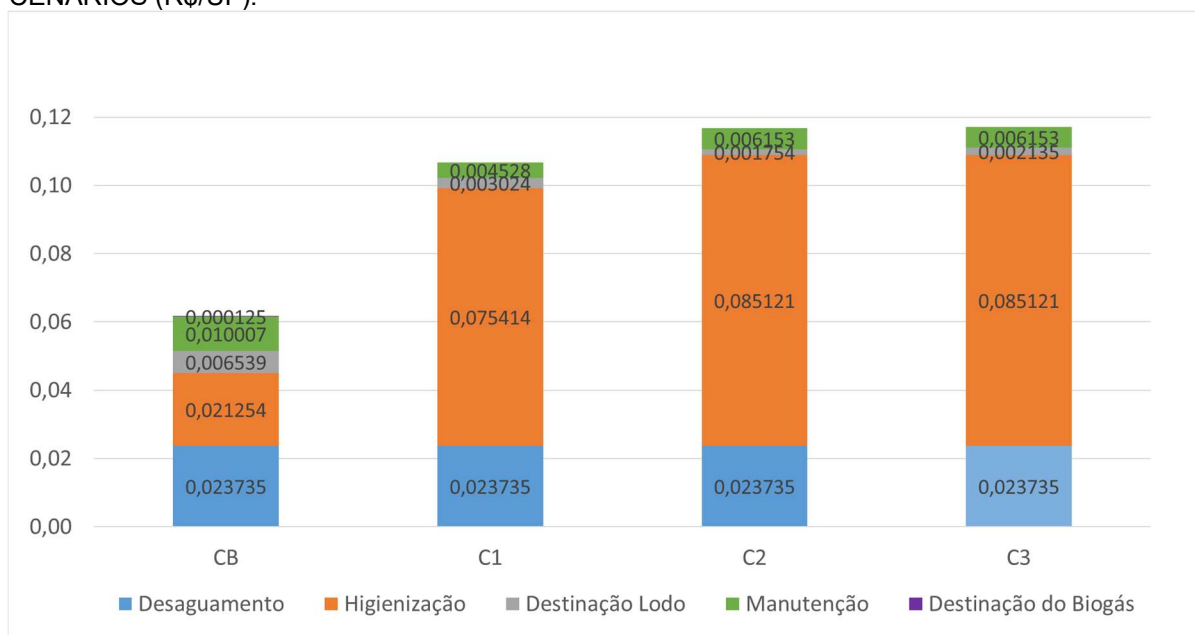
Para o custo de energia elétrica consumida, foi considerado o horário de ponta (0,66 R\$/kwh) e horário fora de ponta (0,46 R\$/kwh) e uma alíquota de ICMS de 29%.

TABELA 28 - CUSTO PARA TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO BIOLÓGICO E BIOGÁS (R\$/UF).

Etapas		CB		C1		C2		C3				
Lodo biológico												
Desaguamento	Centrífuga	Aquisição	0,005525	Centrífuga	Aquisição	0,005525	Centrífuga	Aquisição	0,005525	Centrífuga	Aquisição	0,005525
		Energia consumida	0,001988		Energia consumida	0,001988		Energia consumida	0,001988		Energia consumida	0,001988
		Energia demanda	0,000497		Energia demanda	0,000497		Energia demanda	0,000497		Energia demanda	0,000497
		Polímero	0,001619		Polímero	0,001619		Polímero	0,001619		Polímero	0,001619
		Pessoal	0,014106		Pessoal	0,014106		Pessoal	0,014106		Pessoal	0,014106
		Total	0,023735		Total	0,023735		Total	0,023735		Total	0,023735
Higienização	EAP	Aquisição	0,013873	Secador rotativo sem combustão	Aquisição	0,042577	Secador rotativo com combustão	Aquisição	0,052284	Secador rotativo com combustão	Aquisição	0,052284
		Cal	0,006443		Energia consumida	0,013473		Energia consumida	0,013473		Energia consumida	0,013473
		Mistura (pá carregadeira)	0,000937		Energia demanda	0,002443		Energia demanda	0,002443		Energia demanda	0,002443
		Cal+lodo			Produto químico	0,002815		Produto químico	0,002815		Produto químico	0,002815
					Pessoal	0,014106		Pessoal	0,014106		Pessoal	0,014106
		Total	0,021254		Total	0,075414		Total	0,085121		Total	0,085121
Destinação	Uso agrícola	Análises laboratoriais	0,000943	Uso agrícola	Análises laboratoriais	0,000943	Uso agrícola	Análises laboratoriais	0,000943	Aterro	Transporte e disposição	0,002135
		Transporte	0,00386		Transporte	0,001435		Transporte	0,000560			
		Lancer	0,001243		Lancer	0,000462		Lancer	0,000180			
		Apoio agrônômico	0,000493		Apoio agrônômico	0,000183		Apoio agrônômico	0,000072			
		Total	0,006539		Total	0,003024		Total	0,001754		Total	0,002135
Manutenção	Manutenção	0,010007	Manutenção	0,004528	Manutenção	0,006153	Manutenção	0,006153				
Biogás												
Biogás	0,000125	0	0	0								
TOTAL	0,06166	0,1067	0,116764	0,117144								

A FIGURA 38 apresenta os valores para cada cenário estudado.

FIGURA 38 - CUSTOS PARA TRATAMENTO E DESTINO FINAL DO LODO BIOLÓGICO NOS 4 CENÁRIOS (R\$/UF).



Legenda: CB = Cenário base (lodo sendo higienizado através de EAP e destinado na agricultura, biogás é destruído em queimadores de baixa eficiência), C1 = Cenário 1 (lodo sendo higienizado em secador rotativo, utilizando o calor do biogás, e destinado na agricultura), C2 = Cenário 2 (lodo sendo higienizado em secador rotativo, através do calor do próprio lodo, e as cinzas são destinadas na agricultura, C3 = Cenário 3 (semelhante ao cenário 2 mas as cinzas são destinadas em aterro).

Conforme apresentado na TABELA 28 e na FIGURA 38, o cenário base apresenta o menor custo para o tratamento e destino final do lodo biológico e biogás. A maior contribuição do custo para esse cenário é a etapa de desaguamento (38%), onde o custo com funcionários representa 59% do valor total. Foi considerado, de acordo com o levantado junto à SANEPAR, um total de 4 funcionários para a etapa de desaguamento na centrífuga. Na etapa de higienização, a aquisição do barracão para armazenamento do lodo é a mais significativa, representando 65% dessa etapa. Na destinação final, o custo de transporte é o mais significativo, representando 59% do total dessa etapa.

Para a estimativa do custo da aquisição do barracão para armazenamento e realização da EAP (cenário base), foram observadas as dimensões encontradas na ETE em estudo. O custo foi obtido junto à empresa de construção civil atuante na região.

No cenário 1, o custo elevado se deve à etapa de higienização do lodo biológico (71%), onde a aquisição representa 56% desta etapa, o gasto energético 21% e pessoal 19%. Com relação ao custo para destinação do lodo biológico, este

diminuiu 54% em relação ao cenário base, em virtude da diminuição do volume do lodo a ser destinado.

No cenário 2, o aumento do valor se deve ao valor da aquisição do equipamento para a combustão do lodo biológico. O custo para a destinação diminuiu 73% em virtude da diminuição do volume a ser destinado, com relação ao cenário base.

O custo de destinação do lodo seco (C1), através do calor do biogás, é 42% mais elevado em comparação com o cenário 2 em virtude de um maior volume a ser destinado em comparação das cinzas. O custo para a destinação das cinzas em aterro é 18% mais caro que a destinação agrícola.

Na etapa de destinação agrícola foi considerado os custos para transporte, lacer, análises laboratoriais (sendo 1 lote de lodo para análise por bimestre, de acordo com o porte da UGL) e apoio agrônomo ao agricultor para aplicação do lodo biológico.

4.4 INTERPRETAÇÃO DA ASCV UTILIZANDO O PAINEL DE SUSTENTABILIDADE OU DASHBOARD OF SUSTAINABILITY (DOS)

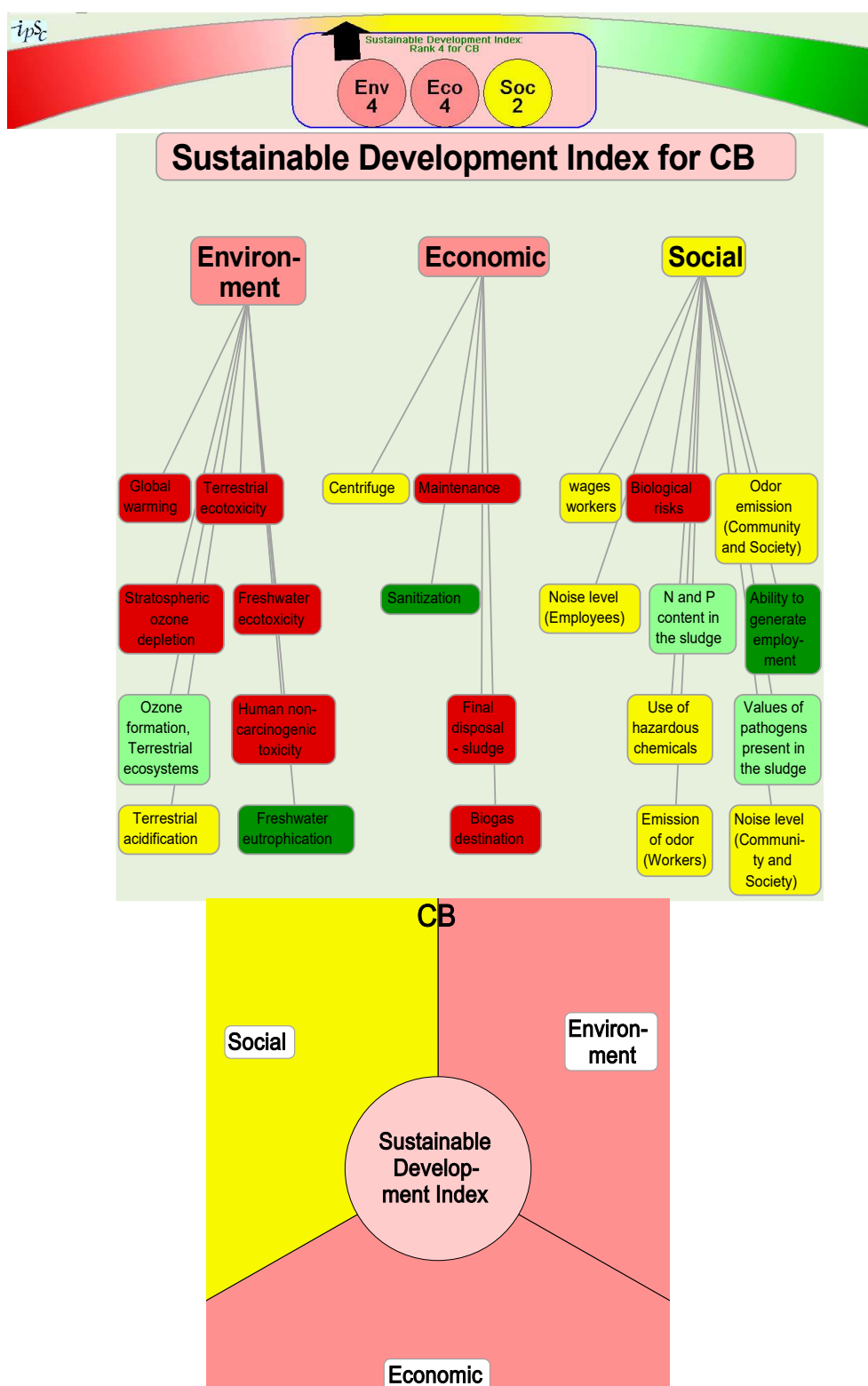
Após a realização da avaliação ambiental, social e econômica, utilizou-se o modelo DoS para a interpretação das 3 dimensões dos 4 cenários. A avaliação utiliza uma escala de cores para expressar os graus de sustentabilidade, conforme apresentado na FIGURA 39.

FIGURA 39 - ESCALA DE CORES UTILIZADAS NO SOFTWARE DoS

Escala de Cores	Grau de Sustentabilidade	Intervalo de pontos
	Excelente	889 - 1000
	Muito bom	778 - 888
	Bom	667 - 777
	Razoável	556 - 666
	Médio	445 - 555
	Ruim	334 - 444
	Muito ruim	223 - 333
	Atenção severa	111 - 222
	Estado crítico	0 - 110
	Sem dados	

A FIGURA 40 apresenta os resultados para o cenário base. A seta demonstra a posição do índice de sustentabilidade na escala de cores. É demonstrado também o grau de sustentabilidade de cada dimensão, através da escala de cor.

FIGURA 40 - RESULTADOS DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA O CENÁRIO BASE*



*NOTA: CB = Cenário base (lodo sendo higienizado através de EAP e destinado na agricultura, biogás é destruído em queimadores de baixa eficiência).

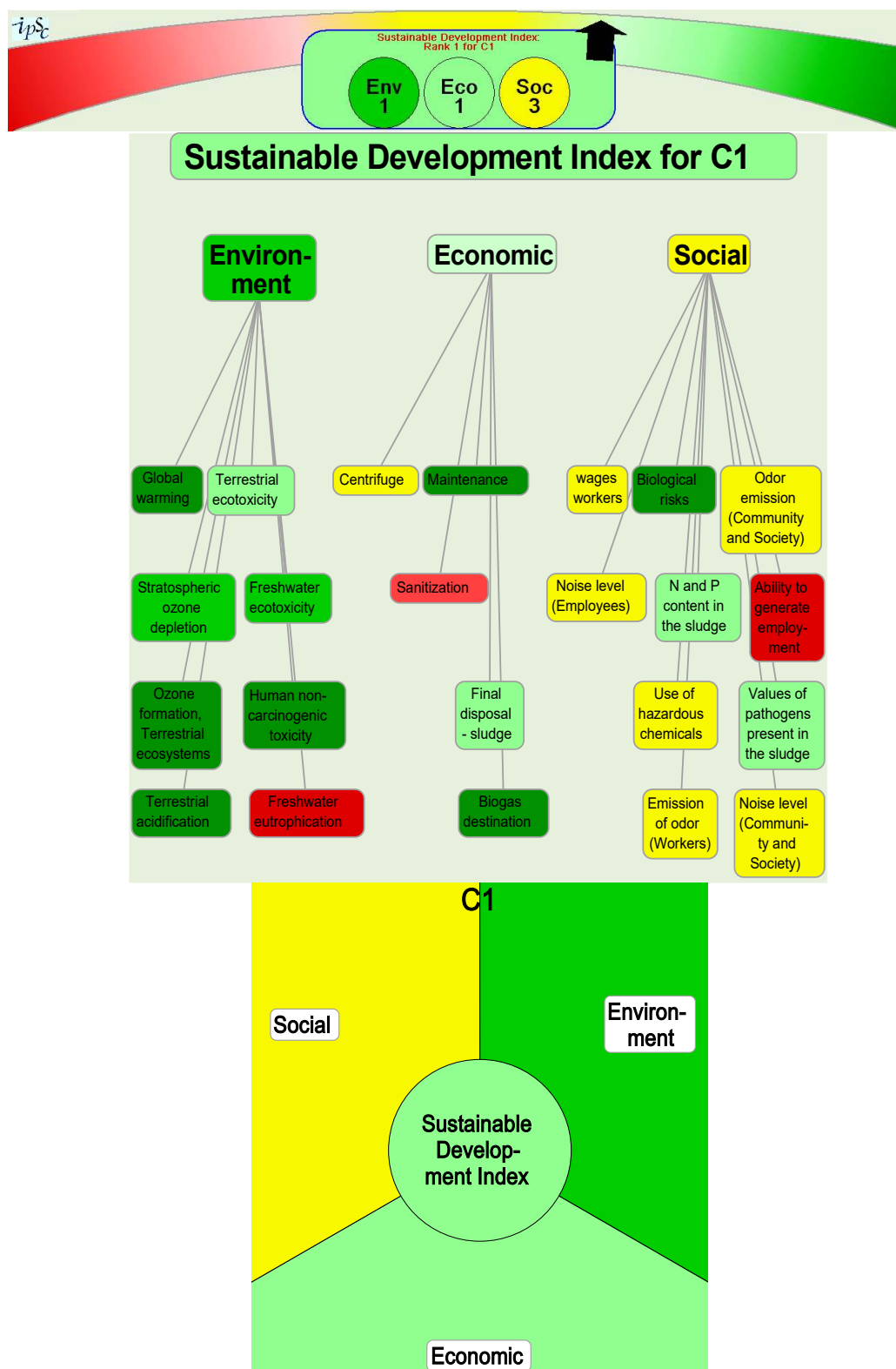
O índice de sustentabilidade para o cenário base apresentou-se como 375 pontos (ruim na escala Dos). A pior dimensão foi a ambiental com as categorias de mudanças climáticas, ecotoxicidade terrestre, depleção do ozônio estratosférico, ecotoxicidade água doce e toxicidade humana não carcinogênica, apresentando-se como “muito ruim” na escala. Na dimensão econômica, os indicadores que apresentaram na pior escala foram: manutenção e destinação do lodo e biogás. Na dimensão social foi o risco biológico no manuseio do lodo.

A FIGURA 41 apresenta o resultado dos indicadores de sustentabilidade para o cenário 1.

O índice de sustentabilidade para o cenário 1 foi de 678 pontos (“bom” na escala DoS). Nenhuma das 3 dimensões apresentou-se como “ruim” na escala. A dimensão social apresentou 550 pontos (“média” na escala), sendo o pior indicador, a capacidade de geração de empregos. Na dimensão econômica, o pior indicador foi a etapa de higienização e na dimensão ambiental foi a categoria de eutrofização de água doce.

Na dimensão ambiental, os melhores indicadores apresentaram-se nas categorias de mudanças climáticas, formação de ozônio, toxicidade humana e acidificação terrestre. Na dimensão econômica, os melhores resultados referem-se ao custo de manutenção e destinação do biogás. Na dimensão social o indicador de risco biológico apresentou-se como o melhor indicador.

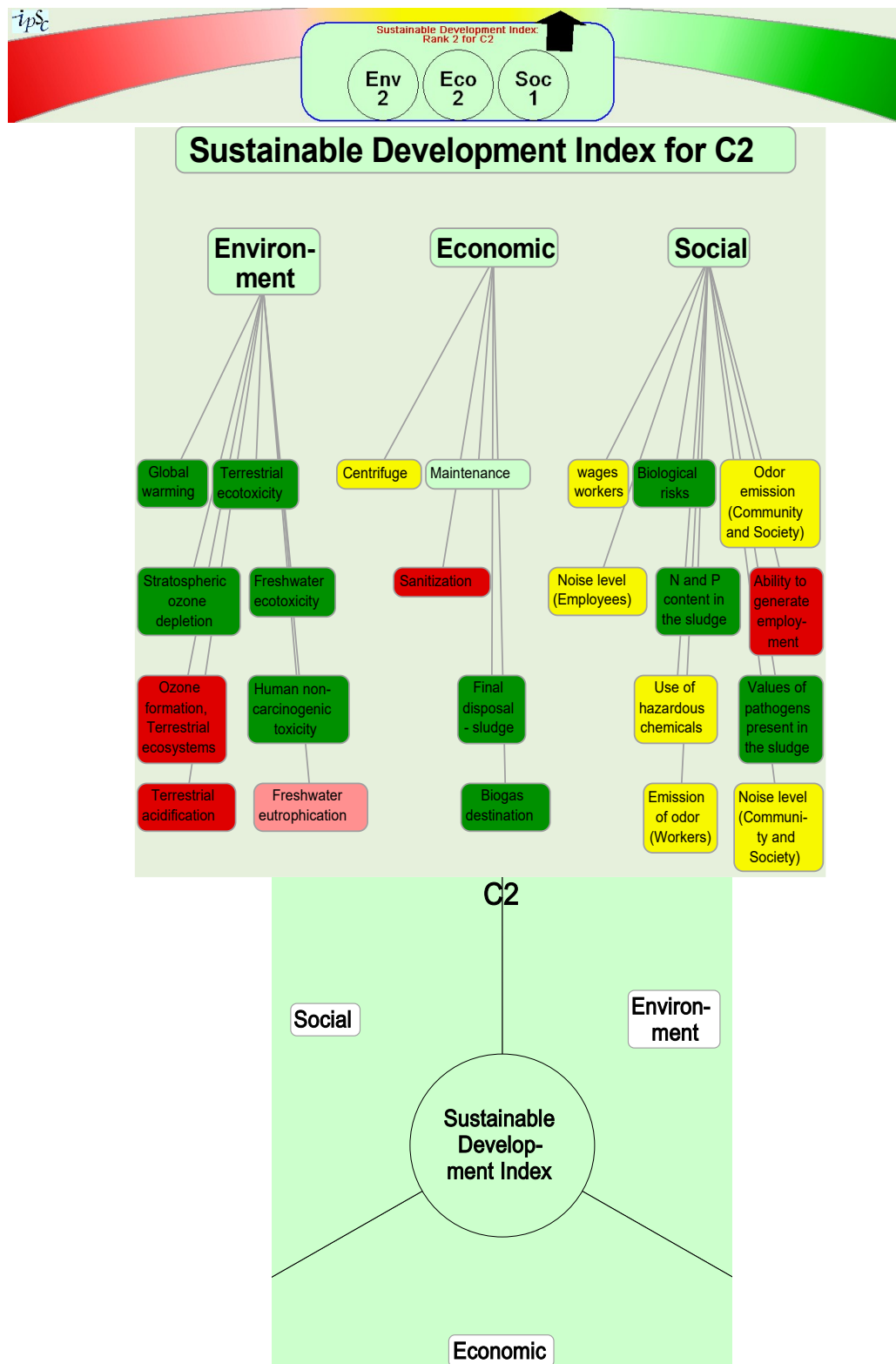
FIGURA 41 - RESULTADOS DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA O CENÁRIO 1*



*NOTA: C1 = Cenário 1 (lodo sendo higienizado em secador rotativo, utilizando o calor do biogás, e destinado na agricultura).

A FIGURA 42 apresenta o resultado dos indicadores de sustentabilidade para o cenário 2.

FIGURA 42 - RESULTADOS DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA O CENÁRIO 2*



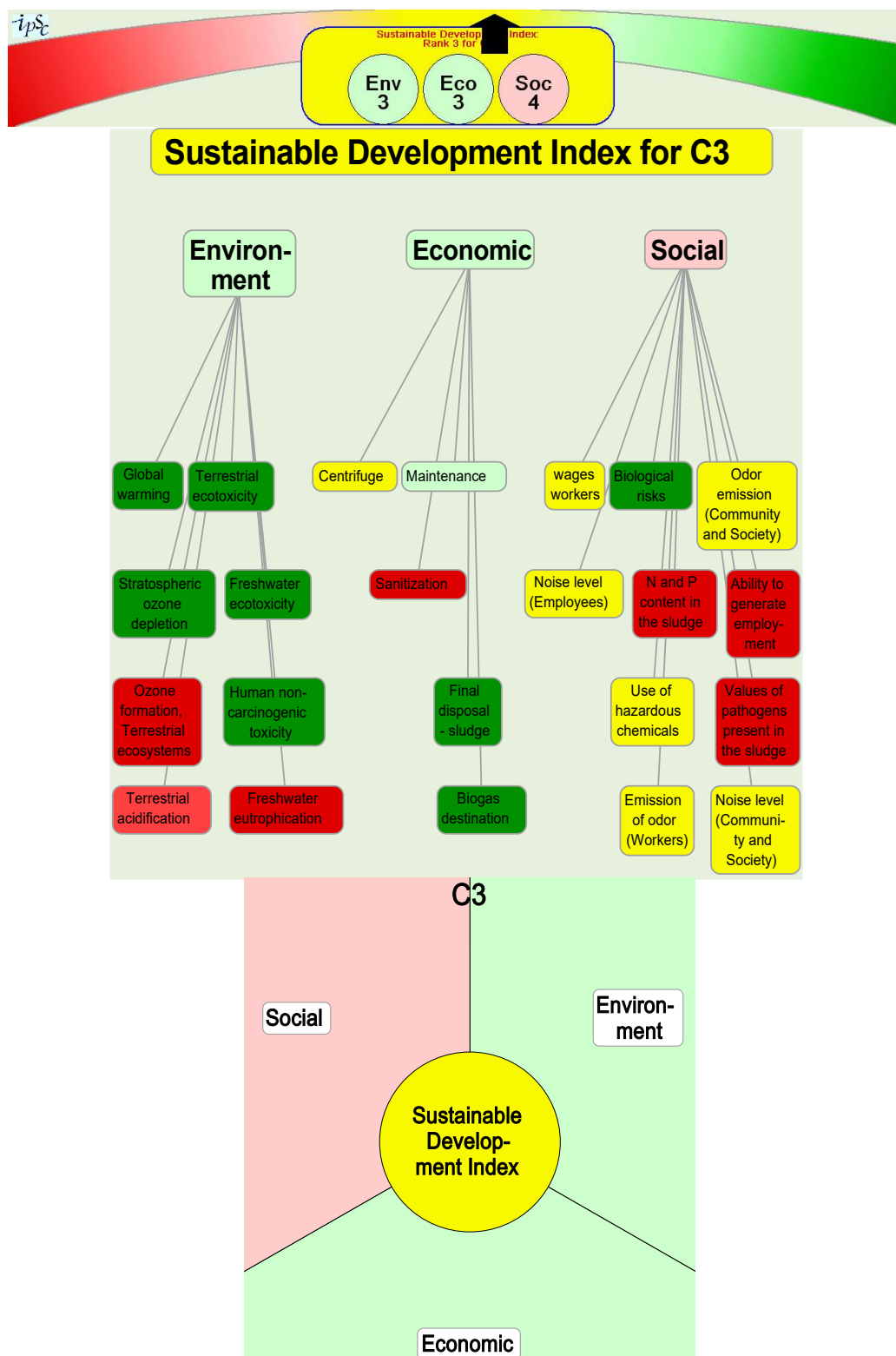
*NOTA: C2 = Cenário 2 (lodo sendo higienizado em secador rotativo, através do calor do próprio lodo, e as cinzas são destinadas na agricultura)

O cenário 2 apresentou índice de sustentabilidade de 629 pontos (razoável na escala DoS). Nas 3 dimensões o nível de sustentabilidade apresentou-se na mesma escala. Na dimensão ambiental os indicadores com os menores índices foram: formação de ozônio, ecossistema terrestre e acidificação terrestre. Na dimensão econômica a etapa com o menor índice foi a higienização e na social o indicador de capacidade de geração de emprego.

A FIGURA 43 apresenta o resultado dos indicadores de sustentabilidade para o cenário 3.

O cenário 3 apresentou índice de sustentabilidade de 547 pontos. A dimensão com a menor pontuação é a social (400 pontos), em que os indicadores de teor de N e P no lodo, capacidade de geração de emprego e valores dos patógenos presentes no lodo foram os indicadores com escala “ruim” no DoS. Na dimensão ambiental, os piores indicadores foram a formação de ozônio, ecossistema terrestre, acidificação terrestre e eutrofização água doce. Na dimensão econômica, a etapa de higienização apresentou a menor pontuação. Os melhores indicadores para a dimensão ambiental foram as categorias de mudanças climáticas, ecotoxicidade terrestre, depleção do ozônio estratosférico, ecotoxicidade água doce e toxicidade humana. Na dimensão social os melhores indicadores foram o custo de destinação do lodo e biogás. Na dimensão social o indicador com a melhor pontuação foi o risco no manuseio do lodo.

FIGURA 43 - RESULTADOS DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA O CENÁRIO 3*.



C3 = Cenário 3 (semelhante ao cenário 2 mas as cinzas são destinadas em aterro).

A TABELA 29 apresenta a pontuação de cada dimensão e o índice de sustentabilidade dos cenários estudados.

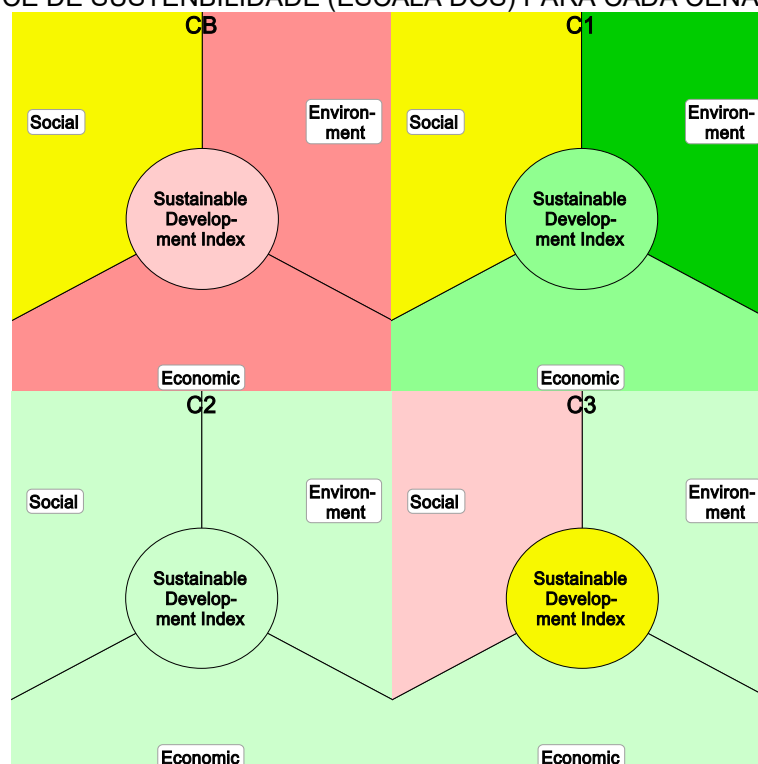
TABELA 29 - PONTUAÇÃO DE CADA DIMENSÃO E ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE DE CADA CENÁRIO ESTUDADO

Cenários/Dimensão	Ambiental	Social	Econômica	Índice de sustentabilidade
Cenário base	277	550	300	375
Cenário 1	813	550	673	678
Cenário 2	656	600	633	629
Cenário 3	624	400	619	547

NOTA: Cenário base = lodo sendo higienizado através de EAP e destinado na agricultura, biogás é destruído em queimadores de baixa eficiência; Cenário 1 = lodo sendo higienizado em secador rotativo, utilizando o calor do biogás, e destinado na agricultura; Cenário 2 = lodo sendo higienizado em secador rotativo, através do calor do próprio lodo, e as cinzas são destinadas na agricultura; Cenário 3 = semelhante ao cenário 2 mas as cinzas são destinadas em aterro.

A FIGURA 44 apresenta o índice de sustentabilidade em forma de coloração em cada cenário estudado, com as dimensões, para fins de comparação.

FIGURA 44 - ÍNDICE DE SUSTENBILIDADE (ESCALA DOS) PARA CADA CENÁRIO ESTUDADO.



CB = Cenário base (lodo sendo higienizado através de EAP e destinado na agricultura, biogás é destruído em queimadores de baixa eficiência), C1 = Cenário 1 (lodo sendo higienizado em secador rotativo, utilizando o calor do biogás, e destinado na agricultura), C2 = Cenário 2 (lodo sendo higienizado em secador rotativo, através do calor do próprio lodo, e as cinzas são destinadas na agricultura), C3 = Cenário 3 (semelhante ao cenário 2 mas as cinzas são destinadas em aterro).

Conforme apresentado na TABELA 29 e FIGURA 44, o cenário que obteve a melhor pontuação foi o cenário 1 (coloração verde mais escuro). A dimensão que favoreceu esse cenário foi a ambiental, onde os indicadores de acidificação terrestre e formação de ozônio, ecossistema terrestre foram os indicadores que apresentaram

uma pontuação mais elevada, em comparação com os demais cenários. A menor pontuação no cenário base para a categoria de acidificação terrestre se deve à emissão de NH_3 durante o processo de calagem do lodo e nos cenários 2 e 3 em virtude da emissão de SO_x pela combustão do lodo biológico. Para a categoria de formação de ozônio (ecossistemas terrestres), a menor pontuação nos cenários 2 e 3 se deve ao aumento das emissões de NO_x na combustão do lodo.

O cenário 2 apresentou-se em segundo lugar, apresentando-se como “razoável”. Esse cenário apresentou um melhor índice na dimensão social em relação ao cenário 1 em virtude de um maior teor de concentração de N e P nas cinzas do lodo biológico.

O cenário 3 apresentou-se como uma menor pontuação em comparação aos outros cenários em virtude da dimensão social, devido ao não aproveitamento do potencial agronômico do lodo biológico. O “rank” final para o índice de sustentabilidade foi (do melhor para pior): cenário 1, cenário 2, cenário 3 e cenário base.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo, que teve como objetivo a avaliação da sustentabilidade em diferentes cenários de tratamento e destinação do lodo biológico e biogás, permitiu a confirmação das hipóteses que o gerenciamento conjunto dos subprodutos (lodo e biogás) é a prática mais sustentável a ser aplicada em ETEs anaeróbias de porte semelhante, pela diminuição dos impactos ambientais e sociais. Com relação ao impacto econômico, o custo do cenário base (lodo sendo higienizado por EAP e destinado na agricultura) é o melhor cenário se avaliarmos o custo total. Na avaliação DoS, onde é avaliado cada fase em separado, esse cenário apresentou-se com o pior resultado, em virtude do custo adicional para queima do biogás.

O estudo permitiu a visualização do cenário mais favorável avaliando as 3 dimensões da sustentabilidade.

5.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA AMBIENTAL (ACV – A)

Os resultados obtidos na Avaliação do Ciclo de Vida Ambiental mostraram que a recuperação do calor da combustão do biogás diminuiu significativamente o impacto ambiental associado à categoria de mudanças climáticas (44%), principalmente porque os queimadores abertos possuem baixa eficiência para destruição do metano. Quanto ao tratamento e disposição final do lodo, observou-se que a higienização por meio de cal virgem (cenário base) aumenta o volume final do lodo, aumentando o impacto ambiental associado à ecotoxicidade terrestre. Além disso, a combustão do lodo seco aumenta o impacto ambiental inerente à formação de ozônio e acidificação terrestre devido à conversão de nitrogênio e enxofre presentes no lodo nas emissões de NO_x e SO_x . Finalmente, a ACV mostrou que o uso do biogás gerado nos reatores UASB para a secagem do lodo tem o potencial de reduzir os impactos ambientais em todas as categorias avaliadas. A combustão do lodo e a utilização de calor para higienização (cenários 2 e 3) têm um impacto potencial mais elevado nas categorias acidificação terrestre e formação de ozônio (ecossistemas terrestres). O cenário 1 apresentou uma melhoria em relação ao cenário base para todas as categorias avaliadas nas quais diferenças significativas foram obtidas. A utilização de biogás em ETEs para a secagem do lodo é uma opção viável, e o biogás gerado foi suficiente para secar o lodo, com impactos ambientais

reduzidos em todas as áreas avaliadas. É importante destacar que os dados obtidos foram extraídos de inventários elaborados em uma única ETE e baseados em um sistema piloto específico. Assim, diferentes resultados poderiam ser obtidos em outras situações. No entanto, os resultados mostram algumas novas perspectivas para promover a sustentabilidade ambiental associada ao gerenciamento integrado de biogás e lodo dos reatores UASB. Além disso, a abordagem de ACV pode ser usada em outras ETEs semelhantes.

5.2 AVALIAÇÃO SOCIAL

De acordo com o inventário realizado e a avaliação dos aspectos sociais associados ao gerenciamento do lodo e do biogás da ETE, os parâmetros que devem ser gerenciados para a melhoria da avaliação social do cenário base são: odor, ruído e a higienização do lodo biológico. As vantagens da tecnologia de tratamento e destinação final do lodo biológico, que obtiveram maior pontuação no cenário base foram: o aproveitamento dos nutrientes presentes, na agricultura, e a geração de emprego. Ao utilizar o secador biológico obteve-se melhoria no aspecto de riscos biológicos aos trabalhadores, porém uma piora no indicador de capacidade de geração de emprego. No cenário 2, onde é realizada a combustão do lodo, a principal vantagem se refere à parte interessada “consumidores”, pelo alto teor de nutrientes presente nas cinzas e ausência de patógenos. No cenário 3 (onde as cinzas são destinadas para aterro), os indicadores que demonstraram uma pior avaliação, em comparação com os outros cenários, foram o teor de N e P presente no lodo e patógenos, em virtude do não aproveitamento agronômico do lodo.

5.3 ANÁLISE DO CUSTO DE CICLO DE VIDA – ACCV

O cenário base (lodo sendo higienizado através da EAP e destinado na agricultura) é o cenário com o menor custo do ciclo de vida, porém apresenta o maior custo para a destinação do lodo. A etapa que mais contribui para o custo é o desaguamento em centrífuga, onde o custo com funcionários tem a maior representatividade.

O alto custo dos cenários 1, 2 e 3 se deve ao valor de aquisição do equipamento para a secagem do lodo utilizando-se o calor do biogás (C1) e do lodo (C2 e 3). O custo de destinação do lodo biológico no cenário 1 diminui 54% e no cenário 2 diminui 73% em comparação com o cenário base em virtude do menor volume de lodo/cinza a ser destinado. O custo para a destinação das cinzas em aterro é 18% mais caro que a destinação agrícola.

5.4 INTERPRETAÇÃO DA ASCV UTILIZANDO O PAINEL DE SUSTENTABILIDADE OU DASHBOARD OF SUSTAINABILITY (DoS)

O cenário 1, onde é utilizado o calor do biogás para a secagem do lodo e esse destinado na agricultura, obteve a maior pontuação (melhor cenário) no DoS. A dimensão que favoreceu esse cenário foi a ambiental, onde os indicadores de acidificação terrestre e formação de ozônio, ecossistema terrestre foram os indicadores que apresentaram uma pontuação mais elevada, em comparação com os demais cenários. O cenário 2 apresentou-se em segundo lugar, obtendo um melhor índice na dimensão social, em relação ao cenário 1, em virtude de um maior teor de N e P nas cinzas do lodo biológico. O cenário 3 apresentou-se como uma menor pontuação em comparação aos outros cenários em virtude da dimensão social, devido ao não aproveitamento do potencial agronômico do lodo biológico.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação de outros cenários de destino do lodo biológico e biogás. O biogás poderia ser utilizado para a geração de eletricidade e esta ser utilizada na própria ETE. Sugere-se também, a avaliação de outras configurações de estações de tratamentos e pós-tratamentos de reatores UASB.

Sugere-se, também, a avaliação utilizando a mesma base de dados, ou seja, o lodo biológico proveniente da mesma fonte de geração contendo a mesma concentração de metais e potencial agrônômico (concentração de N e P).

Com relação ao metano dissolvido no efluente, como se apresentou com uma parcela significativa de contribuição para a categoria de mudanças climáticas (37-67%), sugere-se o estudo do cenário em que ocorra a sua recuperação e aproveitamento, como uma câmara de dessorção.

Com relação à avaliação social, este trabalho não abrangeu todo o seu ciclo de vida, fica como sugestão a avaliação das organizações envolvidas na aquisição de produtos e destino final dos resíduos e subprodutos.

Na avaliação da sustentabilidade utilizou-se o *software* DoS, sem atribuir pesos para os indicadores. Sugere-se a elaboração de questionários para especialistas para a atribuição de pesos de acordo com a significância de cada indicador. Nesta etapa sugere-se, também, a elaboração de *software* específico para Estações de Tratamento de Esgotos.

REFERÊNCIAS

ACCOUNTABILITY, AA1000SES. **Stakeholder Engagement Standard**. AccountAbility, Londres 2015.

AGEPAR – Agência Reguladora do Paraná. Nota Técnica Final RTP - 01/2017. Primeira revisão tarifária periódica da SANEPAR, 2017.

AISSE, M. M. **Sistemas Econômicos de Tratamento de Esgotos Sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, 192p., 2000.

AISSE, M. M. **Tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. 2002. Tese (Programa de Pós Graduação em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

AISSE, M. M.; FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. Aspectos tecnológicos e de processos In: **Reciclagem de biossólidos** - transformando problemas em soluções. 2 ed. Curitiba : SANEPAR - Fundo Editorial, v.1, p. 49-119, 2001.

ALBRECHT. Proposta Técnica/Comercial Nº 382, 2014.

ALBRECHT. Proposta Técnica/Comercial Nº 182, 2017.

AMARAL, K. G. C.; AISSE, M. M.; POSSETTI, G. R. C. Avaliação dos impactos ambientais no tratamento anaeróbio de efluentes domésticos baseado na Análise de Ciclo de Vida: Estudo de caso no Brasil. In XXXV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais....** Colômbia, 2016.

ANDREOLI, C. V; VON SPERLING, M; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – **NBR ISO 14.040**. Gestão Ambiental: Princípios e estruturas. Rio de Janeiro, 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT –. **NBR ISO 14.044**. Gestão Ambiental: Requisitos e orientações. 2014b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - **NBR-10151**. Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – **NBR-12.209**. Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. 2ª Ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

AUSTRALIA BIOSOLIDS PARTNERSHIP. Biosolids production and end use in Australia. AUSTRALIAN WATER ASSOCIATION. Disponível em: <<http://www.biosolids.com.au/bs-australia.php>>. Acessado:05/04/2018.

AZEVEDO NETTO, J. M. Aproveitamento do gás de esgotos. **Revista DAE**, 41, 15-44, 1977.

BARÉA, P. B. **Desaguamento e higienização do lodo de esgotos sanitários: pré-dimensionamento e estimativas de custos de implantação**. 114f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2013.

BEECHER, N.; CRAWFORD, K.; GOLDSTEIN, N; KESTER, G. LONO-BATURA M.; DZIEZYK, E. **A national biosolids regulation, quality and use & disposal survey**. Final report. North East Biosolids and Residuals Association (NEBRA), July 20. 2007. 30 p.

BHOYE, V. Y.; SANER, A. B.; AHER, P. D. Life Cycle Cost Analysis of Sewage Treatment Plants. **International Journal of Modern Trends In Engineering And Research**. Bhavnagar, 2016.

BITTENCOURT, S. **Gestão do processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná: Aplicabilidade da Resolução CONAMA 375/06**. 190f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2014.

BITTENCOURT, S.; SERRAT, B. M.; AISSE, M. M.; GOMES, D. Sewage Sludge Usage in Agriculture: a Case Study of its Destination in Curitiba Metropolitan Region, Paraná, Brazil. In: X Oficina e Seminário Latino Americano de Digestão Anaeróbia (DAAL), Ouro Preto. **Anais**. Ouro Preto, 2011.

BOLLMANN, H. A. O uso da programação de compromissos para a estruturação de um índice de sustentabilidade. In Encontro das ANNPAS, Brasília. **Anais...**Brasília, 2009

BRAGATTO, R. D.; MARTINI, C. A.; STEFFANI, M. A.; ZOREL JÚNIOR, H. E.; BARRETO-RODRIGUES, M. Indicadores ambientais de sustentabilidade sistematizados pelo modelo pressão estado-resposta (PER): análise de águas superficiais na microbacia hidrográfica Passo da Pedra, em Pato Branco – PR. **Revista Brasileira de Agroecologia**. 7(2), 87-103, 2012.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. Resolução n. 01, de 08 de março de 1990. Diário Oficial da União, 1990.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Secretaria de Inspeção do Trabalho. Departamento de Segurança e Saúde no Trabalho. **Manual de Procedimentos para Auditoria no Setor Saneamento Básico**, 2002.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. Resolução n. 375, de 29 de agosto de 2006. **Diário Oficial da União**, 2006.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. Resolução nº 430. Brasília, **Diário Oficial da União**, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao/163_publicacao27072011055200.pdf> Acesso em: 10 de julho de 2014.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Brasília, DF. Ministério das Cidades, 2015.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas / Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental . -- Brasília: ANA, 2017.

CHARLES, C.; SCHEER, M.B.; CUNHA, F.; ANDREOLI, C.V. **Manual técnico para implantação de cortinas verdes e outros padrões vegetais em Estações de Tratamento de Esgoto**. SANEPAR, Curitiba, 2009.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte, UFMG. v.5. 2010.

CHERNICHARO, C. A. L.; DE ALMEIDA; LOBATO, L. C.; ROSA, A. P. Anaerobic domestic wastewater treatment in Brazil: drawbacks, advances and perspectives. **Water** **21**, v. 2012, p. 24-26, 2012.

CHERNICHARO, C. A. L.; van LIER, J. B.; NOYOLA, A.; BRESSANI RIBEIRO, T. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. **Environmental Science Biotechnology**, 2015.

CIÉSLIK, B. M.; NAMIESNIK, J.; KONIECZKA, P. Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. **Journal of Cleaner Production** 90, 2015.

COROMINAS, L. L.; FOLEY, J.; GUEST J. S.; HOSPIDO, A.; LARSEN, H. F.; MORERA, S.; SHAW, A. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art. **Water Research** 47, 2013.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO – CORSAN. Programa de Prevenção de Riscos Ambientais. PPRA. US Santa Maria, 2007.

CURITIBA. Câmara Municipal de Curitiba. Lei Municipal 9800, de 03 de janeiro de 2000. Diário Oficial do Município, 2000.

CURITIBA. Câmara Municipal de Curitiba. Lei Municipal 10625, de 19 de dezembro de 2002. Diário Oficial do Município, 2002.

DAELMAN, M. R. J.; van VOORTHUIZEN, D. E. M.; van DONGEN, U. G. J. M.; VOLCKE, E. I. P.; van LOOSDRECHT, M. C. M. Methane emission during municipal wastewater treatment. **Water Research**, 46, 2012.

DAVID, A. C. **Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio**. Dissertação, Mestrado em Energia. Programa de Interunidades de Pós-graduação em Energia – PIPGE (EP/FEA/IEE/IF), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

DAVIS, M., COONY, R., GOULD, S., DALY, A. Guidelines for life cycle cost analysis. Stanford University, Standford, 2005.

DENMAN, K. L.; BRASSEUR, G.; CHIDTHAISONG, A.; CIAIS, P.; COX, P. M.; DICKINSON, R. E.; HAUGLUSTAIN, D.; HEINZE C.; HOLLAND, E.; JACOB, D.; LOHMANN, U.; RAMACHANDRAN, S.; DA SILVA DIAS, P. L.; WOFSY, S. C.; ZHANG, X. Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

DHILLON, B. S. **Life Cycle Costing: Techniques, Models and Applications**. Ontario:Routledge, 2013.

DOKA, G. **Life cycle inventories of waste treatment services**. Ecoinvent Report. Swiss Centre for Life cycle inventories, Dübendorf, Switzerland, n. 13, 2003.

ETHOS - Instituto Ethos de Empresas e Responsabilidade Social. Disponível em: www3.ethos.org.br/conteudo/iniciativas. Acesso em 13/04/2015.

ETHOS - Instituto Ethos de Empresas e Responsabilidade Social <https://www3.ethos.org.br/conteudo/sobre-o-instituto/#.WobcbainHIU>. Acesso em 03/04/2017.

EUROSTAT STATISTICS EXPLAINED, http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Water_statistics. Acessado: 05/04/2018.

FINKBEINER, M.; SCHAU, E. M.; LEHMANN, A.; TRAVERSO, M. Towards Life Cycle Sustainability Assessment. **Sustainability**, 2, doi:10.3390/su2103309, 2010.

GARRIDO-BASERBA, M.; MOLINOS-SENANTE, M.; ABELLEIRA-PEREIRA, J. M.; FDEZ-GÜELFO, L. A.; POCH, M.; HERNANDEZ-SANCHO, F. Selecting sewage sludge treatment alternatives in modern wastewater treatment plants using environmental decision support systems. **Journal of Cleaner Production** 107, 410-419, 2015.

GERVASONI, R.; CANTÃO, M. P. Produção de metano a partir da digestão anaeróbia: relação entre teoria e prática. **Espaço energia** 15, 13-20, 2011.

GODWIN, A. Benefits of biosolids: how water utilities are turning waste into resource. **Water World** 8, 7, 2012.

GUNDES, S. The Use of Life Cycle Techniques in the Assessment of Sustainability. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 216 916 – 922, 2016.

GUTIERREZ, K. G. **Análise e gerenciamento de impactos ambientais no tratamento de esgoto doméstico mediante avaliação de ciclo de vida**. 112 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

GUTIERREZ, K. G.; FERNANDES, M. A. O.; CHERNICHARO, C. A. L. ACV de dois sistemas simplificados de tratamento de esgoto: UASB+SAC E UASB+FBP. **Anais...** Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015.

GUTIERREZ, K. G.; FERNANDES, M. A. O.; CHERNICHARO, C. A. L. A importância de inventários de ciclo de vida regionalizados e o conhecimento das características ambientais locais para o sucesso da metodologia ACV em sistemas de tratamento de esgoto. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2016.

HALOG, A.; MANIK, Y. Advancing Integrated Systems Modelling Framework for Life Cycle Sustainability Assessment. **Sustainability**, 3, Doi:10.3390/su3020469, 2011.

HERNANDEZ-PADILLA, F.; MARGNI, M.; NOYOLA, A.; GUERECIA-HERNANDEZ, L.; BULLE, C. Assessing wastewater treatment in Latin America and the Caribbean: Enhancing life cycle assessment interpretation by regionalization and impact assessment sensibility. **Journal of Cleaner Production** 142, 2017.

HONG, J.; HONG, J.; MASAHIRO, O.; JOLLIET, O. Environmental and economic life cycle assessment for sewage sludge treatment processes in Japan. **Waste Management**, 29 696–703, 2009.

HOSPIDO, A.; CARBALLA, M.; MOREIRA, M.; OMIL, F.; LEMA J.; FEIJOO, G. Environmental assessment of anaerobically digested sludge reuse in agriculture: potential impacts of emerging micropollutants. **Water research**, 44 3225 – 3233, 2010.

HOUILON, G.; JOLLIET, O. Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge: energy and global warming analysis. **Journal of Cleaner Production**, 13, 287–299, 2005.

HUPPES G., van ROOIJEN M., KLEIJN R., HEIJUNGS R., DE KONING A., van OERS L. **Life Cycle Costing and the environment**. Report of a Project Commissioned by The Ministry of VROM-DGM, 2004.

IFC, 2007. **AA1000 stakeholder engagement standards**. <http://www.accountability21.net/>. Acessado: 05/12/2016.

ISE BOVESPA. Metodologia do índice de sustentabilidade empresarial. http://www.bmfbovespa.com.br/pt_br/produtos/indices/indices-de-sustentabilidade/indice-de-sustentabilidade-empresarial-ise.htm. Acesso: 05/12/2016.

JESUS NETTO, J. P. O gas dos esgotos. **Revista DAE**, 01, 51-53, 1936.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 7. ed. ABES, Rio de Janeiro, 2014.

JUNQUEIRA, R. C. **Valoração monetária dos impactos ambientais de usinas fotovoltaicas através de avaliação de ciclo de vida**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

KAMINSKI, G. F. **Queima eficiente de biogás gerado em reatores UASB em queimador enclausurado**. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, 2017.

KHAN, A. A.; GAUR, R. Z.; TYAGI, V. K.; KHURSHEED, A.; LEW, B.; MEHROTR, I.; KAZM, A. A. Sustainable options of post treatment of UASB effluent treating sewage: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, 55, (12), 1232–1251, 2011.

KOGA, P. **Balanço de massa e energia na ETE Padilha**. Qualificação de mestrado, Programa de Mestrado em meio ambiente urbano e industrial. Universidade Federal do Paraná, 2016.

KRUGER, O.; ADAM, C. Recovery potential of German sewage sludge ash. **Waste Management**, 45 400–406, 2015.

LEWANDOWSKI, D. A. **Design of thermal oxidation systems for volatile organic compounds**. 1º ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 1999. p.24-27, 2000.

LIM, S.; PARK, D.; PARK, J.M. Environmental and economic feasibility study of a total wastewater treatment network system. **Journal of Environmental Management** 88, 2008.

LIU, B.; WEI, Q.; ZHANG, B.; JUN, B. Life cycle GHG emissions of sewage sludge treatment and disposal options in Tai Lake Watershed, China. **Science of the Total Environment**, 447, 361–369, 2013.

LIU, Y.; QU, H. Design and optimization of a reactive crystallization process for high purity phosphorus recovery from sewage sludge ash. **Journal of Environmental Chemical Engineering** 4 2155–2162, 2016.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2011. 184 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2011.

LOBATO, L. C. S.; CHERNICHARO, C.A.L; SOUZA, C.L. Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. **Water Science & Technology**, 66, 12, 2012.

MANARA, P.; ZABANIOTOU, A. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 16, 2.566– 2.582, 2012.

MENDES, N. C. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. Escola de engenharia de São Carlos. São Carlos, 2013.

MUGA, H. E.; MIHELICIC, J. R. Sustainability of wastewater treatment technologies. **Journal of Environmental Management** 88, 2008.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. Metcalf & Eddy inc. 3a ed. Mc Graw-Hill, Nova York, 1991.

METCALF & EDDY Inc. **Wastewater engineering: Treatment and Reuse**. 5 ed. McGraw Hill, Nova York, 2016.

MIKHAILOVA, I. Sustentabilidade: evolução dos conceitos teóricos e os problemas da mensuração prática. **Revista Economia e Desenvolvimento**. 16, 22-41, 2004.

MILLS, N.; PEARCE, P.; FARROW, J.; THORPE, R.B.; KIRKBY, N.F. Environmental & economic life cycle assessment of current and future sewage sludge to energy Technologies. **Waste Management**, 34, 185–195, 2014.

MULLER, S.; LESAGE, P.; CIROTH, A.; MUTEL, C.; WEIDEMA, B. P.; SAMSON, R. The application of the pedigree approach to the distributions foreseen inecoinvent v3. **International Journal Life Cycle Assessment**, p.1-11, 2014.

NELTING, K.; TRAUTMANN, N.; CAICEDO, C.; WEICHGREBE, D.; ROSENWINKEL, K. H.; COSTA, F. J. O. G.; POSSETTI G. R. C. Constraints on the dissolved methane in the effluent of full scale municipal UASB reactors. Anais...The 14th IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies, Florianopolis, 2017.

NEMECEK, T., SCHNETZER, J. Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems. Zurich. Data v3.0, 2011.

NGUYEN, T. A.; KURODA, K.; OTSUKA K. Inclusive Impacts Assessment for the Sustainability of Vegetable Oil-based Biodiesel - Part I: Linkage Between Inclusive Impact Index and Life Cycle Sustainability Assessment. **Journal of Cleaner Production**, 2017.

NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health. Occupational safety and health guideline for ammonia. 1992.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LOPEZ-HERNANDEZ, J. E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and

energy/resource recovery. **Reviews in Environmental Science and BioTechnology**, 5, 93–114, 2006.

NOYOLA, A.; PADILLA-RIVERA A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M. L.; GUERECA, L. P.; HERNANDEZ-PADILLA, F. Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America. **Clean – Soil, Air, Water**, 40 (9), 926–932, 2012.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; GÜERECA, L. P. Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. 1ª ed. México: 2013.

NOYOLA, A.; PAREDES, M. G.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; GUERECA, L. P. Reduction of Greenhouse Gas Emissions From Municipal Wastewater Treatment in Mexico Based on Technology Selection. **Clean – Soil, Air, Water**, 44 (9), 1091–1098, 2016.

NR, Norma Regulamentadora. Ministério do Trabalho e Emprego. NR-15 - Atividades e Operações Insalubres, Brasília, **Diário Oficial da União**, 2014.

ODM – Objetivos do Desenvolvimento do Milênio. <http://www.odmbrasil.gov.br/os-objetivos-de-desenvolvimento-do-milenio>. Acessado: 05/03/2018.

ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. <http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/desenvolvimento-sustentavel-e-meio-ambiente/134-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods>. Acessado: 05/03/2018.

OECD – Organization for Economic Cooperation and Development. Wastewater treatment (indicator), 2017. doi: 10.1787/ef27a39d-en. Acesso em 04/09/2017.

OLIVEIRA, N. S.; AISSE, M. M. Secagem mecanizada de lodos de ETA: centrifugação. In: CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C.V. **Lodo de Estação de Tratamento de Água: Gestão e Perspectivas Tecnológicas**. SANEPAR, 2013. p. 389-418.

ONG, H.C.; MAHLIA, T. M. I.; MASJUKI, H. H.; HONNERY, D. Life cycle cost and sensitivity analysis of palm biodiesel production. **Fuel** 98, 2012.

OTSUKA, K. Inclusive Impact Index “Triple I” for Assessing Ocean Utilization Technologies. **Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering**, 2012.

ONU – Organização das Nações Unidas. Report of the World Commission on Environment and Development, 1987. Disponível em: <http://www.un.org/documents/ga/res/42/ares42-187.htm>

PADILLA-RIVERA, A., MORGAN-SAGASTUME, J. M., NOYOLA, A. M., GUERECA, L. P. Addressing social aspects associated with wastewater treatment facilities. **Environmental Impact Assessment Review** 57, 2016.

PARANÁ. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Instituto Ambiental do Paraná. **Instrução Técnica CEP/DTA N. 001/2002**. Dispõe sobre a utilização agrícola de lodo de estação de tratamento de esgoto sanitário, 2002.

PARANÁ. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Resolução SEMA 001/07 de 11 de janeiro de 2007. Dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento. **Diário Oficial do Estado do Paraná**, Edição 7395, 23 de janeiro de 2007.

PARANÁ. Resolução nº 16. Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA). **Diário Oficial do Estado**, 2014.

PARANÁ. Resolução nº 21. Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA). **Diário Oficial do Estado**, 2009.

PARANÁ. Lei nº 18.766. Assembleia Legislativa do Estado do Paraná. **Diário Oficial do Estado**, 2016.

PARK, K.; LEE, H.; PHELAN, S.; LIYANAARACHCHI, S.; MARLENI, N.; NAVARATNA, D.; JEGATHEESAN, V.; SHU, L. Mitigation strategies of hydrogen sulphide emission in sewer networks - A review. **International Biodeterioration & Biodegradation** 95, 2014.

POLAZ, C. N. M.; TEIXEIRA, B. A. N. Indicadores de sustentabilidade para a gestão municipal de resíduos sólidos urbano: um estudo para São Paulo. **Engenharia sanitária e ambiental**. 14, 411-420, 2009.

POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; GERVASONI, R.; ALTHOFF, C. A.; CARNEIRO, C. Investigação experimental de um sistema piloto de secagem térmica de lodo movido a biogás. **Anais... Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2015.

PRADO, M. R.; KASKANTZIS NETO, G. A análise do ciclo de vida como ferramenta de otimização de processos e gestão ambiental. **Revista Eletrônica Polidisciplinar Voos**. 1, 4-11, 2005.

PRÉ, various authors. SimaPro Database Manual - Methods Library. 2013. Disponível em: <http://www.presustainability.com/download/manuals/DatabaseManualMethods.pdf>. Acesso em: 16 de abril de 2015.

ProBio 1.0: Programa de estimativa de produção de biogás em reatores UASB. Disponível em: site.sanepar.com.br/probio/probio.zip.

PRESSINOTTI, F.; SILVA, J. M. Aspectos Construtivos de Reatores Tipo UASB e Aproveitamento Energético do Biogás. Apostila de curso. Curitiba, 2015.

RAMIREZ, P. K. S. **Social life cycle impact assessment: a characterization method for subcategories**. 116 f. Tese. (Doutorado em inovação, contabilidade, ambiente e finanças) - Scuola superiore "G. d'Annunzio", Università degli studi "G. d'Annunzio", 2013.

RAMIREZ, P. K. S.; PETTI, L.; HABERLAND, N.T.; UGAYA, C. M. L. Subcategory assessment method for social life cycle assessment. Part 1: methodological framework. **International Journal Life Cycle Assessment**, 19:1515–1523, 2014.

REBITZER, G.; HUNKELER, D.; JOLLIET, O. LCC - The economic pillar of sustainability: Methodology and application to wastewater treatment. *Environmental Progress*, 22, 2003.

REICHERT, G.A. Apoio à tomada de decisão por meio da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos : o caso de Porto Alegre. Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 2013.

RENOU, S.; THOMAS, J. S.; AOUSTIN, E., THOMAS J.S.; , PONS, M.N. Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. **Journal of Cleaner Production** 16, 2008.

RIETOW, J. C. **Uso do biogás gerado em reatores anaeróbios para a secagem e higienização do lodo de esgoto**. 97 f. Trabalho de conclusão de curso. (Graduação em Engenharia Ambiental) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2014.

ROSA, A. P. **Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto**. 172 f. Tese (doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

ROSA, A. P; CONESA, J. A.; FULLANA; A., MELO G. C. B.; BORGES, J. M.; CHERNICHARO, C. A. L. Energy potential and alternative usages of biogas and sludge from UASB reactors: case study of the Laboreaux wastewater treatment plant. **Water Science & Technology** 73.7., 2016.

ROSS, B. Z. L.; MARQUES, C. J.; CARNEIRO, C; COSTA, F. J. O. G.; FROEHNER, S.; AISSE M. M. Avaliação do impacto da incorporação de espuma em lodo de esgoto destinado a uso Agrícola. In: XXXIV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais....** México, 2014.

ROSS, B. Z. L. **Escuma de reatores anaeróbios tratando esgotos domésticos: produção, caracterização e disposição final**. Tese (Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) Universidade Federal do Paraná). 2015.

SADHUKHAN, J. Distributed and micro-generation from biogas and agricultural application of sewage sludge: Comparative environmental performance analysis using life cycle approaches. **Applied Energy**, 122, 196–206, 2014.

SAI, 2008. Guidance document for social accountability 8000 international. http://www.sa-intl.org/_data/n_0001/resources/live/2008StdEnglishFinal.pdf. Acessado 05/12/2016.

SAMPAIO, A. O.; GONÇALVES, M. M. C. Custos operacionais de estações de tratamento de esgotos por lodos ativados: estudo de caso ETE – Barueri. **Anais...** In: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, 1999.

SANCHES, A. B. **Avaliação da Sustentabilidade de Sistemas de Tratamento de Esgotos Sanitários: Uma proposta metodológica**. Tese de doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

SCHIRMER, W. N.; LACEY, M. E. Q.; LISBOA, H. M.; MIRANDA, G. R. Características, natureza e métodos de amostragem/análise de gases odorantes emitidos em processos industriais: caso das lagoas de tratamento de efluentes. *Revista de Ciências Ambientais*, 1, 2: 35 - 52, 2007.

SOUZA, C. L.; CHERNICHARO, C. A. L.; AQUINO, S. F. Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions. **Water Science & Technology**, 64.11, 2011.

STILLWELL, A. S.; HOPPOCK, D. C.; WEBBER, D. M. E. Energy Recovery from Wastewater Treatment Plants in the United States: A Case Study of the Energy-Water Nexus. **Sustainability**, 2, 945-962, 2010.

SWISS CENTER FOR LIFE-CYCLE INVENTORIES, 2009. Ecoinvent database. <http://www.ecoinvent.org/> (accessed February 2015)

TARANTINI, M.; BUTTOL, P.; MAIORINO, L. An environmental lca of alternative scenarios of urban sewage sludge treatment and disposal. **Thermal Science**, 2007.

TAUSSEF, S. M.; ABBASI, T.; ABBASI, S. A. - Energy recovery from wastewater with high-rate anaerobic digesters - **Renewable and Sustainable Energy** 19, 2013.

TRAVERSO M.; FINKBEINER M. Life Cycle Sustainability Dashboard. Proceeding of the 4th International Conference on Life Cycle Management, Cape Town, South Africa, 2009.

TRAVERSO, M.; FINKBEINER, M.; JØRGENSEN, A.; SCHNEIDER, L. Life Cycle Sustainability Dashboard. **Journal of Industrial Ecology**, 2012.

UGAYA, C. M. L. Avaliação do ciclo de vida de produtos. In: ADISSI, P.J.; PINHEIRO, F.A.; CARDOSO R.S. **Gestão Ambiental de Unidades Produtivas**. Campus, 2013. p. 275-298.

UNDP - United National Global Compact, 2015. Disponível em: <https://www.unglobalcompact.org/sdgs>

UNEP/SETAC, Life Cycle Initiative. **Guidelines for social life cycle assessment of products**. United Nations Environment Program, Paris, United Nations Environment Programme. Social and socio-economic LCA guidelines. 2009.

UNEP/SETAC. Towards a Life Cycle Sustainability Assessment. UNEP/SETAC Life-Cycle Initiative, 2011

UNEP/SETAC, Life Cycle Initiative. Guide to Social LCA: The Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA), 2013.

USEPA: **A plain English guide to the EPA 503 part biosolids rule**. Washington: USEPA, 1994 Disponível em: http://water.epa.gov/scitech/wastetech/biosolids/503pe_index.cfm >. Acesso em: 03/05/2018.

USEPA, Life Cycle Assessment: **Principles and Practice. Scientific Applications** International Corporation (SAIC). U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, Ohio. 2006.

Van HAANDEL, A. C. Tratamento Anaeróbio – Aeróbio de Esgoto. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 17, Natal, 1993. **Anais...** Rio de Janeiro, ABES. 1993. V2 (1): 768-83.

VOGEL, C.; KRUGER, O.; HERZEL, H.; AMIDANI, L.; ADAM, C. Chemical state of mercury and selenium in sewage sludge ash based P-fertilizers. **Journal of Hazardous Materials** 313 179–184, 2016.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte, UFMG. v.2. 1996.

VON SPERLING, M. **Análise dos Padrões Brasileiros de Qualidade das Águas de Corpos Receptores e de Lançamento de Efluentes Líquidos**. RBRH. 3, 1998.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. 4. ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

WANG, N.; SHIH, C.; CHIUH, P.; HUANG, Y. Environmental Effects of Sewage Sludge Carbonization and Other Treatment Alternatives. **Energies**, 6, 871-883, 2013.

WEIDEMA, B. P.; WESNAES, M. S. Data quality management for life cycle inventories - an example of using data quality indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3-4, p 167-174, 1996.

WICARE, 2016. Wages and working conditions in social in the world country reports. <http://www.wageindicator.org/main/salary/living-wage>. (Acessado: 06/12/2016).

XU, C.; CHEN, W.; HONG, J. Life-cycle environmental and economic assessment of sewage sludge treatment in China. **Journal of Cleaner Production**, 67, 79-87, 2014.

YOSHITAKE, M. Gestão de Custos do Ciclo de Vida de um Ativo. In: IV Congresso Internacional de Custos, 1995, Campinas. **Anais...**Campinas, 1995.

ZORTEA, R. B. **Avaliação da Sustentabilidade do Biodiesel da Soja no Rio Grande do Sul**: uma abordagem do ciclo de vida. 238 f. Tese. (Doutorado em

Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

APÊNDICE 1 – ANÁLISE DE INCERTEZA

Neste estudo, a simulação de Monte Carlo foi aplicada para a estimativa da incerteza dos dados do inventário. Para usar esta simulação, o Desvio Padrão (DP) de cada entrada do ciclo de vida do inventário foi obtido pela combinação de Matriz Pedigree, Matriz Básica de Incerteza e Vetor Pedigree. O Vetor Pedigree, resultante da classificação feita neste estudo, assim como a Incerteza Básica e o Desvio Padrão de cada entrada, são compilados na Tabela A.1.

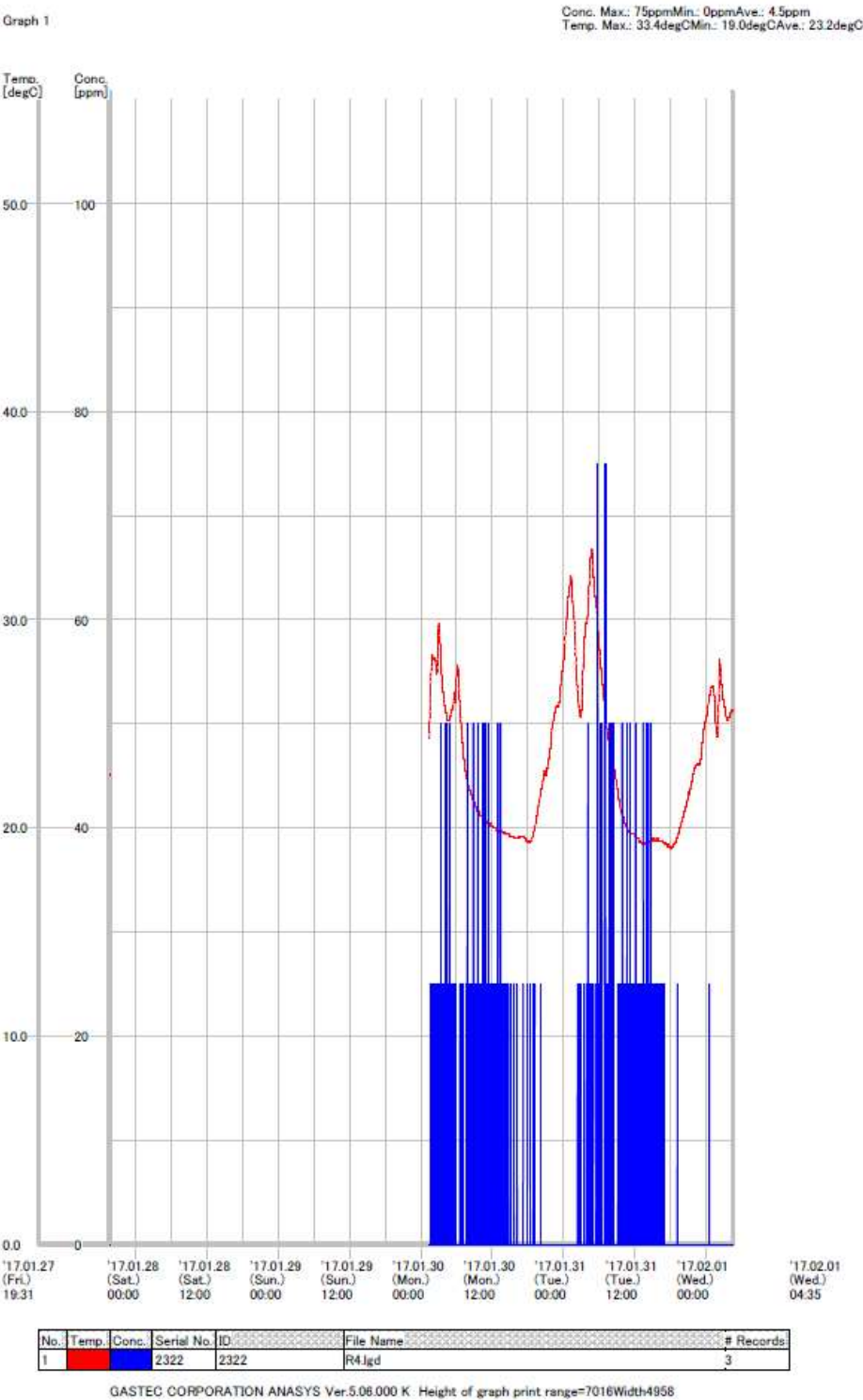
Tabela A.1 - Entradas e seus respectivos Vetores Pedigree (VP), Incertezas Básicas (IB) e Desvios Padrão (DP) utilizados no cálculo da incerteza.

	VP	IB	DP
Dewatering			
Polymer	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Transport	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Electricity	(1,4,1,1,1,3)	1,04	1,12
Effluent	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Sanitization - PAS			
Dewatered sludge	(1,4,1,1,1,2)	1,04	1,11
Quicklime	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Transport	(3,4,1,1,1,3)	1,04	1,16
Fuel	(4,4,1,1,1,3)	1,04	1,24
Water	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
NH ₃	(3,4,1,1,1,3)	1,04	1,16
CO ₂	(3,4,1,1,1,3)	1,07	1,17
CO	(3,4,1,1,1,3)	1,04	1,16
NO _x	(3,4,1,1,1,3)	1,04	1,16
Particulates	(3,4,1,1,1,3)	1,04	1,16
Sanitation – Rotary Dryer			
Electricity	(3,1,1,1,1,1)	1,06	1,12
Water	(1,4,1,1,1,4)	1,04	1,15
Particulates	(1,4,2,3,2,4)	1,05	1,17
CO	(1,4,2,3,2,4)	1,01	1,16
SO _x	(1,4,2,3,2,4)	1,05	1,17
NO _x	(1,4,2,3,2,4)	1,05	1,17
Effluent	(2,4,2,3,2,3)	1,05	1,15
Sanitation – Rotary Dryer + Combustion			
Electricity	(3,1,1,1,1,1)	1,06	1,12
Water	(1,4,1,1,1,4)	1,04	1,15
Particulates	(1,4,2,3,2,5)	1,06	1,25
CO	(1,4,2,3,2,5)	1,06	1,25
SO _x	(1,4,2,3,2,5)	1,06	1,25
NO _x	(1,4,2,3,2,5)	1,06	1,25
Effluent	(2,4,2,3,2,3)	1,06	1,25
Destination			
Ureia	(1,4,1,1,1,2)	1,04	1,11
P ₂ O ₅	(1,4,1,1,1,2)	1,04	1,11
Transport	(1,4,1,1,1,3)	1,04	1,12
Fuel	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Ar			

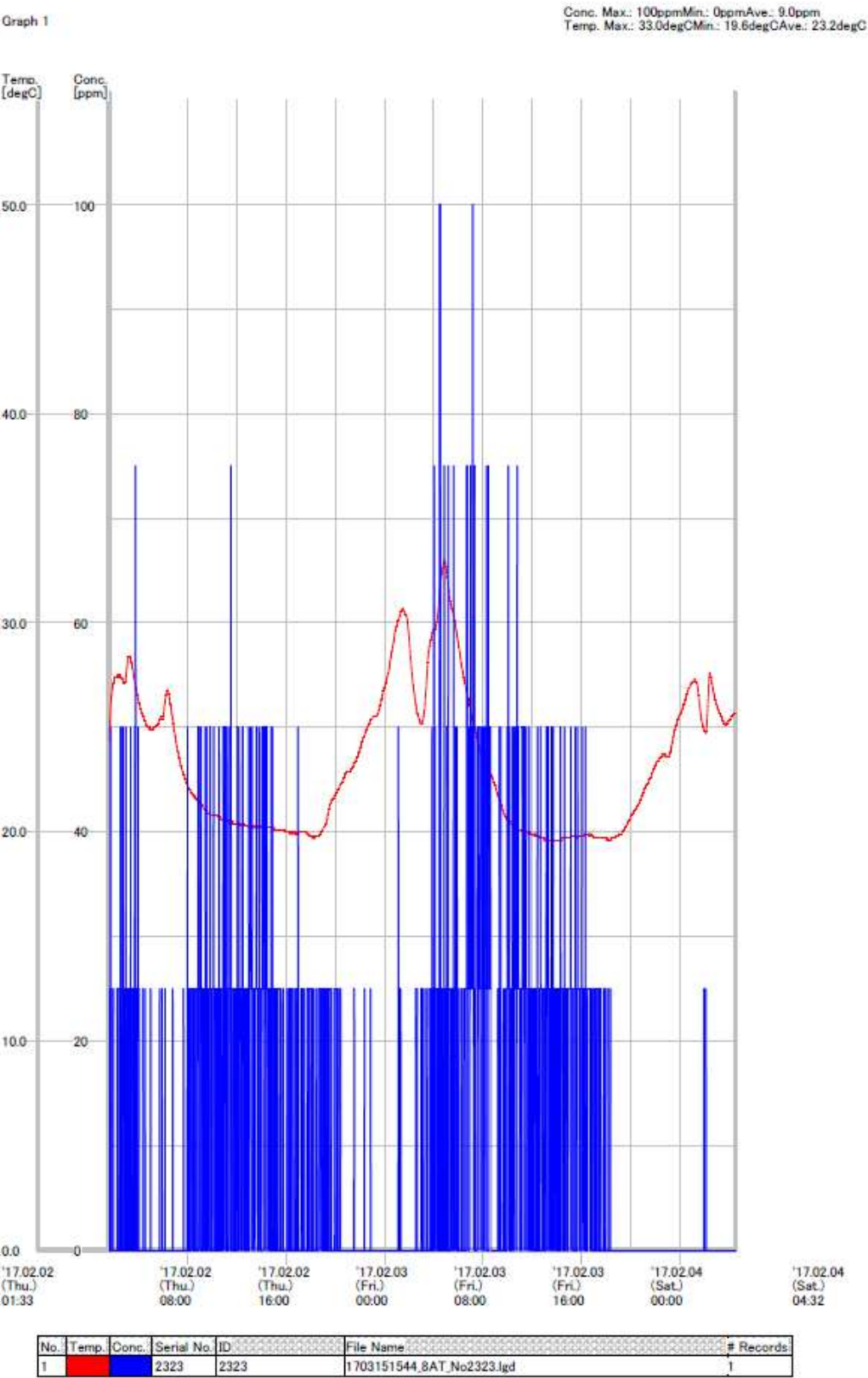
NH ₃	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
N ₂ O	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
NO _x	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
CO	(4,4,1,1,1,3)	1,04	1,24
Particulates	(4,4,1,1,1,3)	1,04	1,24
<i>água</i>			
NO ₃	(2,4,1,1,1,3)	1,03	1,14
PO ₄	(2,4,1,1,1,3)	1,03	1,14
Cd	(2,4,1,1,1,3)	1,03	1,13
Cu	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Zn	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Pb	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Ni	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Cr	(2,4,1,1,1,3)	1,03	1,13
Hg	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Solo			
Cd	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Cu	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Zn	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Pb	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Ni	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Cr	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14
Hg	(2,4,1,1,1,3)	1,06	1,14

APÊNDICE 2 – GRÁFICO DO RESULTADO DAS MEDIÇÕES CONTÍNUAS DE H₂S NAS CANALETAS

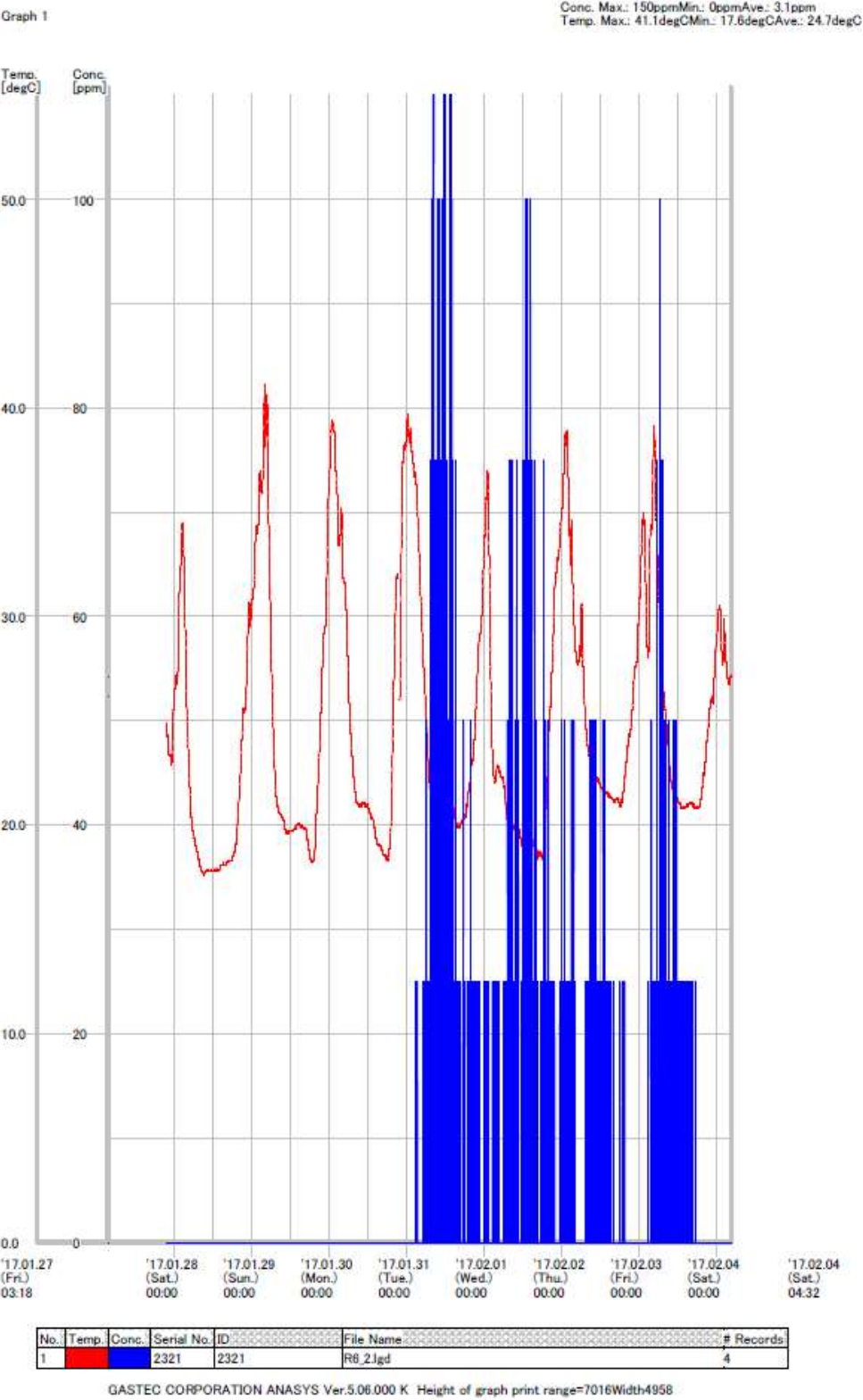
Reator 4



Reator 5



Reator 6



APÊNDICE 3 – INVENTÁRIO ECONÔMICO

C.1 CENÁRIO BASE (Lodo sendo higienizado por EAP e destinado na agricultura. Biogás direcionado para queimadores abertos)

	Descritivo	Valor	Unidade	Observações
Lodo biológico				
Aquisição				
	<i>Custo total (centrífuga, tq eq, obra, bombas, preparador de pol)</i>	1.182.412	Reais	Fonte: Barea (2013) (Valores atualizados segundo INCC)
	<i>Custo total</i>	59.120,64	R\$/ano	Vida útil: 20 anos
Operação				
Energia				
	Potência total equipamentos	15,25	kW	Fonte: Amaral e Koga, 2016
	Energia elétrica consumida	72.699,20	kWhe/ano	Considerando: Bomba dosadora, agitadores, centrífuga e rosca transportadora
	Custo de energia elétrica de consumo (f. ponta)	0,46	R\$/Kwh	ICMS 29%
	Custo de energia elétrica de consumo (ponta)	0,66	R\$/Kwh	ICMS 29%
	<i>Custo horário fora ponta</i>	29.565,45	R\$/ano	
	<i>Custo horário ponta</i>	6.035,58	R\$/ano	
	<i>Custo total energia consumida</i>	35.601,03	R\$/ano	
	Tarifa demanda ponta	34,73	R\$/mês	
	Tarifa demanda fora ponta	13,89	R\$/mês	
	<i>Custo demanda ponta</i>	6.356,07	R\$/ano	
	<i>Custo demanda fora da ponta</i>	2.541,46	R\$/ano	
	<i>Custo total demanda</i>	8.897,54	R\$/ano	
	<i>Custo total energia elétrica</i>	44.498,57	R\$/ano	
Produtos químicos				
	Polímero	2292	kg/ano	Fornecedor: SNF
	Custo	12,65	R\$/kg	
	<i>Polímero</i>	28.993,80	R\$/ano	
Pessoal				
	Custo anual (Salário base+alimentação+imposto)	63.161,93	R\$/ano	Custo de 1 operador: R\$ 4.858,61 Fonte: Sanepar, 2017
	Nº de funcionários destinados para tratam. do lodo	4	Funcionários	Fonte: Sanepar, 2017
Centrífuga	<i>Custo funcionários</i>	252.647,72	R\$/ano	
Aquisição				
	Construção do barracão	2.710.335,6	R\$	Medidas: 4 barracões de 21 m de frente e 30 m de largura (Total: 84m x 30m)
	Sistema Silo cal e mistura	258.495,00	R\$	Fonte: Barea (2013) (Valores atualizados segundo INCC)
	<i>Custo total</i>	148.441,53	R\$/ano	
Produto químico				
	Cal	397.929,59	kg/ano	Fornecedor: Polical
EAP	Custo cal	0,29	R\$/kg	

	<i>Custo total Cal</i>	115.399,58	R\$/ano	
	Custo mistura (cal+lodo)			Mistura e remanejamento
	Custo locação pá carregadeira	0,00764	R\$/kg de lodo hig	Gerson Franquito transp e log. LTDA
	Agrícola			
	Custo de transporte	0,03146	R\$/kg de lodo hig	
	Custo lancer	0,01013	R\$/kg de lodo hig	
	Análises laboratoriais	16887,66	R\$/ano	1 lote por bimestre
Destinação	Apoio agrônômico	0,00402	R\$/kg de lodo hig	Julio Bastos - Viabilidade de aplicação
Manutenção		179.228,34	R\$/ano	Fonte: Sanepar, 2017
	Biogás			
	Aquisição queimador flare aberto	20.000	R\$	Fonte: Biochama, 2017
	Custo anual	1333,33	R\$/ano	Vida útil: 15 anos

**C.2 CENÁRIO 1 (Lodo sendo higienizado em secador e destinado na agricultura.
Biogás direcionado para a secagem do lodo)**

	Descritivo	Valor	Unidade	Observações
Centrífuga	Aquisição			
	<i>Custo total (centrífuga, tq eq, obra, bombas, preparador de pol)</i>	1.182.412	Reais	Fonte: Barea (2013) (Valores atualizados segundo INCC)
	<i>Custo total</i>	59.120,64	R\$/ano	Vida útil: 20 anos
	Operação			
	Energia			
	Potência total equipamentos	15,25	kW	Fonte: Amaral e Koga, 2016
	Energia elétrica consumida	72.699,20	kWhe/ano	Considerando: Bomba dosadora, agitadores, centrífuga e rosca transportadora
	Custo de energia elétrica de consumo (f. ponta)	0,46	R\$/Kwh	ICMS 29%
	Custo de energia elétrica de consumo (ponta)	0,66	R\$/Kwh	ICMS 29%
	<i>Custo horário fora ponta</i>	29.565,45	R\$/ano	
	<i>Custo horário ponta</i>	6.035,58	R\$/ano	
	<i>Custo total energia consumida</i>	35.601,03	R\$/ano	
	Tarifa demanda ponta	34,73	R\$/mês	
	Tarifa demanda fora ponta	13,89	R\$/mês	
	<i>Custo demanda ponta</i>	6.356,07	R\$/ano	
	<i>Custo demanda fora da ponta</i>	2.541,46	R\$/ano	
	<i>Custo total demanda</i>	8.897,54	R\$/ano	
	<i>Custo total energia elétrica</i>	44.498,57	R\$/ano	
	Produtos químicos			
	Polímero	2292	kg/ano	Fornecedor: SNF
	Custo	12,65	R\$/kg	
	<i>Polímero</i>	28.993,80	R\$/ano	
	Pessoal			
	Custo anual (Salário base+alimentação+imposto)	63.161,93	R\$/ano	Custo de 1 operador: R\$ 4.858,61 Fonte: Sanepar, 2017
	Nº de funcionários destinados para tratam. do lodo	4	Funcionários	Fonte: Sanepar, 2017
		252.647,7		
	<i>Custo funcionários</i>	2	R\$/ano	
Secador Rotativo	Aquisição			
	<i>Fornecimento</i>	4.340.000,00	R\$	Fonte: Albrecht.
	<i>Custo Instalação</i>	950.000,00	R\$	Fonte: Albrecht.
	<i>Obra civil</i>	1.543.500,00	R\$	Fonte: SINAPI e CUB
	<i>Custo total aquisição</i>	6.833.500,00	R\$	
	<i>Custo anual</i>	455.566,67	R\$/ano	Vida útil: 15 anos
	Operação			
	Energia			
	Potência do equipamento	75,00	Kwh	

			Considerando 75% de eficiência
Potência consumida	56,25	Kwh	
Tarifa demanda ponta	34,7326	R\$	
Tarifa demanda fora ponta	13,8878	R\$	
<i>Custo demanda ponta</i>	31.259,37	R\$/ano	
<i>Custo demanda fora da ponta</i>	12.499,00	R\$/ano	
<i>Custo total demanda</i>	43.758,38	R\$/ano	
Número de horas de operação	8.760,00	hs	
	492.750,0		
Energia elétrica consumida	0	kwh	24 horas diária
Custo de energia elétrica de consumo (f. ponta)	0,4648	R\$/Kwh	
Custo de energia elétrica de consumo (ponta)	0,6642	R\$/Kwh	
	200.392,4		
<i>Custo horário fora ponta</i>	8	R\$/ano	
<i>Custo horario ponta</i>	40.908,76	R\$/ano	
	241.301,2		
<i>Energia consumo</i>	5	R\$/ano	
	285.059,6		
<i>Custo total energia</i>	2	R\$/ano	
Produto químico			
Volume Nonox	2.520,45	L	Considerando experimento piloto: Para cada 94,83 kg de lodo desaguado foi dosado 73 mL de Nonox
			Contato com Continuum Chemical em 13/07/17 Valores: 20-60L - R\$ 26,50/L; 80-200L - R\$ 23,50/L; 200 - 1000L - R\$ 21,30; >1000 L - R\$ 19,00/L.Considerar R\$ 1,00 a mais por litro para o transporte
Custo Nonox	20,00	R\$/L	
<i>Custo total Nonox</i>	50.408,91	R\$/ano	
Pessoal			
Custo anual	63.161,93	R\$/ano	
Números de funcionários destinados para o secador	4	Funcionários	Fonte: Albrecht.
	252.647,7		
<i>Custo funcionários</i>	2	R\$/ano	
Agrícola			
Custo de transporte	0,03146	R\$/kg de lodo hig	
Custo lancer	0,01013	R\$/kg de lodo hig	
Análises laboratoriais	16887,66	R\$/ano	
		R\$/kg de lodo hig	
Destinação	Apoio agrônômico	0,00402	

C3 CENÁRIO 2 (Lodo sendo higienizado em secador, pelo calor da combustão do lodo, e destinado na agricultura. Biogás direcionado para o queimador do secador)

	Descritivo	Valor	Unidade	Observações
Centrífuga	Aquisição			
	<i>Custo total (centrífuga, tq eq, obra, bombas, preparador de pol)</i>	1.182.412	Reais	Fonte: Barea (2013) (Valores atualizados segundo INCC)
	<i>Custo total</i>	59.120,64	R\$/ano	Vida útil: 20 anos
	Operação			
	Energia			
	Potência total equipamentos	15,25	kW	Fonte: Amaral e Koga, 2016
	Energia elétrica consumida	72.699,20	kWhe/ano	Considerando: Bomba dosadora, agitadores, centrífuga e rosca transportadora
	Custo de energia elétrica de consumo (f. ponta)	0,46	R\$/Kwh	ICMS 29%
	Custo de energia elétrica de consumo (ponta)	0,66	R\$/Kwh	ICMS 29%
	<i>Custo horário fora ponta</i>	29.565,45	R\$/ano	
	<i>Custo horario ponta</i>	6.035,58	R\$/ano	
	<i>Custo total energia consumida</i>	35.601,03	R\$/ano	
	Tarifa demanda ponta	34,73	R\$/mês	
	Tarifa demanda fora ponta	13,89	R\$/mês	
	<i>Custo demanda ponta</i>	6.356,07	R\$/ano	
	<i>Custo demanda fora da ponta</i>	2.541,46	R\$/ano	
	<i>Custo total demanda</i>	8.897,54	R\$/ano	
	<i>Custo total energia elétrica</i>	44.498,57	R\$/ano	
	Produtos químicos			
	Polímero	2292	kg/ano	Fornecedor: SNF
	Custo	12,65	R\$/kg	
	<i>Polímero</i>	28.993,80	R\$/ano	
	Pessoal			
	Custo anual (Salário base+alimentação+imposto)	63.161,93	R\$/ano	Custo de 1 operador: R\$ 4.858,61 Fonte: Sanepar, 2017
	Nº de funcionários destinados para tratam. do lodo	4	Funcionários	Fonte: Sanepar, 2017
	<i>Custo funcionários</i>	252.647,72	R\$/ano	
Secador Rotativo	Aquisição			
	<i>Fornecimento</i>	5.898.000,00	R\$	Fonte: Albrecht.
	<i>Custo Instalação</i>	950.000,00	R\$	Fonte: Albrecht.
	<i>Obra civil</i>	1.543.500,00	R\$	Fonte: SINAPI e CUB
	<i>Custo total aquisição</i>	8.391.500,00	R\$	
	<i>Custo anual</i>	559.433,3	R\$/ano	Vida útil: 15 anos
	Operação			
	Energia			
	Potência do equipamento	75,00	Kwh	

			Considerando 75% de eficiência
Potência consumida	56,25	Kwh	
Tarifa demanda ponta	34,7326	R\$	
Tarifa demanda fora ponta	13,8878	R\$	
<i>Custo demanda ponta</i>	31.259,37	R\$/ano	
<i>Custo demanda fora da ponta</i>	12.499,00	R\$/ano	
<i>Custo total demanda</i>	43.758,38	R\$/ano	
Número de horas de operação	8.760,00	hs	
	492.750,0		
Energia elétrica consumida	0	kwh	24 horas diária
Custo de energia elétrica de consumo (f. ponta)	0,4648	R\$/Kwh	
Custo de energia elétrica de consumo (ponta)	0,6642	R\$/Kwh	
	200.392,4		
<i>Custo horário fora ponta</i>	8	R\$/ano	
<i>Custo horario ponta</i>	40.908,76	R\$/ano	
	241.301,2		
<i>Energia consumo</i>	5	R\$/ano	
	285.059,6		
<i>Custo total energia</i>	2	R\$/ano	
Produto químico			
Volume Nonox	2.520,45	L	Considerando experimento piloto: Para cada 94,83 kg de lodo desaguado foi dosado 73 mL de Nonox
			Contato com Continuum Chemical em 13/07/17 Valores: 20-60L - R\$ 26,50/L; 80-200L - R\$ 23,50/L; 200 - 1000L - R\$ 21,30; >1000 L - R\$ 19,00/L.Considerar R\$ 1,00 a mais por litro para o transporte
Custo Nonox	20,00	R\$/L	
<i>Custo total Nonox</i>	50.408,91	R\$/ano	
Pessoal			
Custo anual	63.161,93	R\$/ano	
Números de funcionários destinados para o secador	4	Funcionários	Fonte: Albrecht.
	252.647,7		
<i>Custo funcionários</i>	2	R\$/ano	
Agrícola			
Custo de transporte	0,03146	R\$/kg de lodo hig	
Custo lancer	0,01013	R\$/kg de lodo hig	
Análises laboratoriais	16887,66	R\$/ano	
		R\$/kg de lodo hig	
Destinação	Apoio agrônômico	0,00402	

C.4 CENÁRIO 3 (Lodo sendo higienizado em secador, pelo calor da combustão do lodo, e destinado em aterro. Biogás direcionado para o queimador do secador)

	Descritivo	Valor	Unidade	Observações
Centrífuga	Aquisição			
	<i>Custo total (centrífuga, tq eq, obra, bombas, preparador de pol)</i>	1.182.412	Reais	Fonte: Barea (2013) (Valores atualizados segundo INCC)
	<i>Custo total</i>	59.120,64	R\$/ano	Vida útil: 20 anos
	Operação			
	Energia			
	Potência total equipamentos	15,25	kW	Fonte: Amaral e Koga, 2016
	Energia elétrica consumida	72.699,20	kWhe/ano	Considerando: Bomba dosadora, agitadores, centrífuga e rosca transportadora
	Custo de energia elétrica de consumo (f. ponta)	0,46	R\$/Kwh	ICMS 29%
	Custo de energia elétrica de consumo (ponta)	0,66	R\$/Kwh	ICMS 29%
	<i>Custo horário fora ponta</i>	29.565,45	R\$/ano	
	<i>Custo horário ponta</i>	6.035,58	R\$/ano	
	<i>Custo total energia consumida</i>	35.601,03	R\$/ano	
	Tarifa demanda ponta	34,73	R\$/mês	
	Tarifa demanda fora ponta	13,89	R\$/mês	
	<i>Custo demanda ponta</i>	6.356,07	R\$/ano	
	<i>Custo demanda fora da ponta</i>	2.541,46	R\$/ano	
	<i>Custo total demanda</i>	8.897,54	R\$/ano	
	<i>Custo total energia elétrica</i>	44.498,57	R\$/ano	
	Produtos químicos			
	Polímero	2292	kg/ano	Fornecedor: SNF
	Custo	12,65	R\$/kg	
	<i>Polímero</i>	28.993,80	R\$/ano	
	Pessoal			
	Custo anual (Salário base+alimentação+imposto)	63.161,93	R\$/ano	Custo de 1 operador: R\$ 4.858,61 Fonte: Sanepar, 2017
	Nº de funcionários destinados para tratam. do lodo	4	Funcionários	Fonte: Sanepar, 2017
	<i>Custo funcionários</i>	252.647,72	R\$/ano	
Secador Rotativo	Aquisição			
	<i>Fornecimento</i>	5.898.000,00	R\$	Fonte: Albrecht.
	<i>Custo Instalação</i>	950.000,00	R\$	Fonte: Albrecht.
	<i>Obra civil</i>	1.543.500,00	R\$	Fonte: SINAPI e CUB
	<i>Custo total aquisição</i>	8.391.500,00	R\$	
	<i>Custo anual</i>	559.433,33	R\$/ano	Vida útil: 15 anos
	Operação			
	Energia			
	Potência do equipamento	75,00	Kwh	

			Considerando 75% de eficiência
Potência consumida	56,25	Kwh	
Tarifa demanda ponta	34,7326	R\$	
Tarifa demanda fora ponta	13,8878	R\$	
<i>Custo demanda ponta</i>	31.259,37	R\$/ano	
<i>Custo demanda fora da ponta</i>	12.499,00	R\$/ano	
<i>Custo total demanda</i>	43.758,38	R\$/ano	
Número de horas de operação	8.760,00	hs	
	492.750,0		
Energia elétrica consumida	0	kwh	24 horas diária
Custo de energia elétrica de consumo (f. ponta)	0,4648	R\$/Kwh	
Custo de energia elétrica de consumo (ponta)	0,6642	R\$/Kwh	
	200.392,4		
<i>Custo horário fora ponta</i>	8	R\$/ano	
<i>Custo horario ponta</i>	40.908,76	R\$/ano	
	241.301,2		
<i>Energia consumo</i>	5	R\$/ano	
	285.059,6		
<i>Custo total energia</i>	2	R\$/ano	
Produto químico			
Volume Nonox	2.520,45	L	Considerando experimento piloto: Para cada 94,83 kg de lodo desaguado foi dosado 73 mL de Nonox
			Contato com Continuum Chemical em 13/07/17 Valores: 20-60L - R\$ 26,50/L; 80-200L - R\$ 23,50/L; 200 - 1000L - R\$ 21,30; >1000 L - R\$ 19,00/L.Considerar R\$ 1,00 a mais por litro para o transporte
Custo Nonox	20,00	R\$/L	
<i>Custo total Nonox</i>	50.408,91	R\$/ano	
Pessoal			
Custo anual	63.161,93	R\$/ano	
Números de funcionários destinados para o secador	4	Funcionários	Fonte: Albrecht.
	252.647,7		
<i>Custo funcionários</i>	2	R\$/ano	
Aterro			
Custo transporte + disposição	0,11999	R\$/kg de lodo	
Destinação	Custo anual		

ANEXO 1 – INDICADORES SOCIAIS: REQUISITO BÁSICO E ESCALA DE NÍVEL PARA CADA SUBCATEGORIA.

Subcategorias	Requisito básico (BR)	Não atendimento ao Requisito básico (BR)	
	Nível B	Nível C	Nível D
Categoria: Trabalhadores			
Liberdade de Associação e Negociação Coletiva	Há evidências de trabalhadores (pelo menos um) associados na união do trabalhador, com base na Convenção da OIT No.87.	Pontuação dos direitos dos trabalhadores (WRS), utilizado o (CIRI, 2012). Pontuação entre 0 e 2,9.	Pontuação dos direitos dos trabalhadores (WRS), utilizado o (CIRI, 2012). Pontuação entre 3 e 4.
Trabalho Infantil	Existe uma política para evitar o trabalho infantil e não há evidência de trabalho infantil. Idade mínima de 14 anos (países em desenvolvimento).	A organização não possui política, o trabalho infantil é uma prática comum, mas não ocorre na “pior forma de trabalho infantil”, conforme descrito na C182 (ILO, 2012) ou a criança frequentar a escola.	A organização não possui política e o trabalho infantil ocorre na “pior forma de trabalho infantil”, conforme descrito na C182 (ILO, 2012).
Faixa salarial	O menor salário é igual ou maior do que o salário mínimo no setor/país em que a organização está localizada.	Quando o LWppp (CF) é maior do que ou igual ao GDPppp (CF).	Quando o LWppp (CF) é menor do que GDPppp (CF).
Horas trabalhadas	Número médio de horas trabalhadas por semana pelos trabalhadores, que não deverá exceder oito no dia e quarenta e oito na semana.	A organização é avaliada no nível C quando o número médio de horas trabalhadas por semana é menor do que o número médio de horas trabalhadas por semana no país.	Número médio de horas trabalhadas por semana é menor do que o número médio de horas trabalhadas por semana no país.
Trabalho forçado	Presença de uma política contra o trabalho forçado ou a falta de evidência de trabalho forçado.	A organização está localizada em um país onde o trabalho forçado é uma prática comum. Esta informação é dada por DOL (2010).	A organização está localizada em um país onde o trabalho forçado é uma prática comum. Esta informação é dada por DOL (2010).
Igualdade de oportunidades/ Discriminação	A organização tem um sistema de gestão, ou ações políticas para prevenir a discriminação e promove a igualdade de oportunidades para trabalhadores, de acordo com as convenções da OIT nº 100, No. 111 e nº 169 (ILOLEX, 2012). Ver Índice de Igualdade de gênero	Existe evidência na organização de discriminação e o país que ela está localizada tem Índice de Equidade de Gênero - GEI PNUD (2010) inferior a 50.	Existe evidência na organização de discriminação e o país que ela está localizada tem Índice de Equidade de Gênero - GEI PNUD (2010) superior a 50.
Saúde e segurança ocupacional	A organização tem uma política / orientações ou programa relacionados à saúde e	Acidentes de trabalho da organização (taxas de	Acidentes de trabalho da Organização (taxas de

	segurança, em cumprimento com as Convenções da OIT No.115 No. 161	lesões e ferimentos ocupacionais fatais – em cumprimento das convenções da OIT No.115 e No. 161 (ILOLEX 2012).) são inferiores ao acidentes de trabalho do país / indústria (taxas de lesões e acidentes de trabalho fatais) onde a organização está localizada.	lesões e ferimentos ocupacionais fatais) são iguais ou superiores ao acidentes de trabalho do país onde a organização está localizada.
Benefícios Sociais / Segurança Social	A organização fornece mais de dois dos seguintes benefícios: previdência social, aposentadoria, deficiente físico, dependentes, benefícios para sobreviventes, licença maternidade paga e licença paternidade, licença doença paga, educação e treinamento, plano de saúde, plano dental, seguro paramédico, incluindo a medicina preventiva, seguro remédio e seguro salário.	A organização fornece dois ou menos benefícios sociais.	A organização não fornece benefícios sociais.
<i>Categoria: Consumidor</i>			
Saúde e segurança	A organização possui normas de saúde e segurança relativas ao produto.	A organização não possui casos de violação da saúde e segurança do trabalhador nos últimos 3 anos.	A organização possui casos de violação da saúde e segurança do trabalhador nos últimos 3 anos.
Mecanismo de Feedback	A organização possui presença de mecanismos de feedback e práticas relacionadas à satisfação dos clientes.	A organização não tem registro de reclamação de consumidores.	A organização possui registro de reclamação de consumidores.
Privacidade do consumidor			
Transparência	A organização possui relatórios para Divulgação de dados de sustentabilidade, como por exemplo: Corporate Social Responsibility (CSR), Social Balance Report, Global Reporting Initiative (GRI), Accountability 1000, Social Accountability 8000, ISO 26000 ou outro documento reconhecido internacionalmente.	A organização possui maneiras de mostrar ao consumidor as novas tecnologias, boas práticas e conduta gerencial, como por exemplo através da internet.	A organização não possui iniciativa neste tópico.

Responsabilidade pelo destino	A organização possui sistema de gestão interna que fornece informação clara sobre as opções de destino.	Existe a possibilidade de reciclagem no fim da vida do produto.	Não existe a possibilidade de reciclagem no fim da vida do produto.
<i>Categoria: Comunidade local</i>			
Acesso a recursos materiais	Existem sistemas de gestão interna que assegurar o uso sustentável dos recursos naturais, a prevenção da poluição e reciclagem de resíduos.	O IDH (PNUD, 2010) do país onde a organização está localizada está entre 0 e 0,5.	O IDH (PNUD, 2010) do país onde a organização está localizada está entre 0,51 e 1.
Acesso a recursos imateriais	Existem sistemas de gestão interna que promove: 1) serviços comunitários, como a saúde, programas de educação e de concessão de empréstimos; e/ou 2) compartilhamento de informações e conhecimento e transferência de tecnologia e habilidades para a comunidade (UNEP e SETAC 2010).	A pontuação da prontidão tecnológica (WEF, 2010) do país onde a organização está localizada é entre 1 e 3,5 e a pontuação da liberdade de expressão (Bertelsmann Stiftung 2012) do país em que a organização está localizada é entre 1 e 5.	A pontuação da prontidão tecnológica (WEF, 2010) do país onde a organização está localizada é entre 3,6 e 7 e a pontuação da liberdade de expressão (Bertelsmann Stiftung 2012) do país em que a organização está localizada é entre 5,1 e 10.
Migração	A organização possui um sistema de gestão interna que previne a migração involuntária ou onde não existe a migração causada pela organização.	A organização está localizado em uma região com uma taxa de migração líquida negativa para zero (Population Reference Bureau 2011).	A organização está localizado em uma região com uma taxa de migração líquida positiva (Population Reference Bureau 2011).
Herança cultural	A organização possui evidências de que contribui para a preservação do patrimônio cultural através de contribuições para organizações artísticas e culturais (UNEP e SETAC 2010).	O país onde a organização opera não possui patrimônio cultural em perigo (UNESCO 2012).	O país onde a organização opera possui patrimônio cultural em perigo (UNESCO 2012).
Condições de vida segura e saudável	A organização contribui para a saúde da comunidade local por meio de um sistema de gestão de riscos ambientais ou participando de organizações locais comunicando os potenciais impactos na saúde e segurança de suas operações (UNEP and SETAC 2010).	A organização está localizada em um país onde o disability-adjusted life year (DALY) é superior a 20000.	A organização está localizada em um país onde o disability-adjusted life year (DALY) é igual ou menor a 20000.
O respeito dos direitos indígenas	A organização possui Política para a proteção dos direitos indígenas ou adota a consulta prévia quando a sua operação envolve terras indígenas.	O país não possui casos de violação dos direitos indígenas nos últimos 3 anos.	O país possui casos de violação dos direitos indígenas nos últimos 3 anos.
A participação da comunidade	Evidência de que o ambiente, a saúde ou o bem-estar de uma	Não há registro de casos comprovados de que grupos	Há registro de casos comprovados de que

	comunidade é considerado importante pela organização (UNEP e SETAC 2010). Por exemplo, um sistema de gestão ambiental, análise de risco ou ação pública local (Agenda 21) pode ser considerado como prova do requisito básico. O número e qualidade de reuniões com a comunidade partes interessadas e Suporte organizacional (horas voluntárias ou financeiro) para a comunidade local também são evidências (UNEP e SETAC 2010).	comunitários / membros foram afetados pelas ações ou pelos produtos da organização nos últimos três anos	grupos comunitários / membros foram afetados pelas ações ou pelos produtos da organização nos últimos três anos
Emprego local	Evidência de que a organização tem preferência pela contratação local. Como exemplo/indicador: Porcentagem de trabalhadores contratados localmente, Existência de Política para contratação local, Porcentagem de gastos com fornecedores locais (UNEP e SETAC 2010).	A organização está localizado em um país com uma relação emprego e população (KILM 2012) inferior a 50.	A organização está localizado em um país com uma relação emprego e população (KILM 2012) igual ou superior a 50.
Condições seguras	Não há nenhuma evidência de conflitos com a comunidade local ou ações / organizacionais que podem colocar em risco suas condições de vida seguras (UNEP e SETAC 2010).	A organização está localizada em um país com uma percepção de segurança (UNDP 2010) que é inferior 50.	A organização está localizada em um país com uma percepção de segurança (UNDP 2010) que é igual ou superior a 50.
Categoria: Sociedade			
Compromissos públicos para as questões de sustentabilidade	Evidência de qualquer promessa ou acordo relacionado com a sustentabilidade, que podem ser divulgadas através do site da organização, materiais promocionais ou outros meios.	Não há registro de casos comprovados de que a organização tenha violado os seus compromissos com a sustentabilidade nos últimos três anos.	Há registro de casos comprovados de que a organização tenha violado os seus compromissos com a sustentabilidade nos últimos três anos.
Contribuição para o desenvolvimento económico	A organização fornece uma contribuição para a economia, que é divulgado através do site da organização, materiais promocionais ou outros meios (UNEP e SETAC 2010).	Não há registro de casos comprovados de que a organização tenha danificado ou restringido o desenvolvimento económico da região nos últimos três anos.	há registro de casos comprovados de que a organização tenha danificado ou restringido o desenvolvimento económico da região nos últimos três anos.
Prevenção e mitigação de conflitos armados	Há evidências relacionadas com a prevenção e mitigação de conflitos armados, através do site da organização, materiais	Não há registro de casos comprovados de que a organização provoca ou ajuda conflitos armados em	Há registro de casos comprovados de que a organização provoca ou ajuda conflitos armados

	promocionais ou outros meios (UNEP e SETAC 2010).	qualquer região do planeta nos últimos três anos	em qualquer região do planeta nos últimos três anos
Desenvolvimento de tecnologia	A organização participa em pesquisa e desenvolvimento conjunto de tecnologias eficientes e ambientalmente saudáveis, que se dissemina através do site da organização, materiais promocionais ou outros meios (UNEP e SETAC 2010).	O país ou setor onde a organização está localizada tem um baixo investimento (faixas percentuais de 0 a 2,35%) no desenvolvimento de tecnologia (PNUD 2010).	O país ou setor onde a organização está localizada tem um alto investimento (porcentagem varia de 2,35 e 4,75%) no desenvolvimento de tecnologia (PNUD 2010).
Corrupção	A organização tem implementado medidas para prevenir a corrupção (UNEP e SETAC 2010), que são divulgados através do site da organização, materiais promocionais ou outros meios.	A pontuação do Índice de Corrupção do País - CPI do país está entre 0 e 5 (Transparency International 2010).	A pontuação do Índice de Corrupção do País - CPI do país está entre 5,1 e 10 (Transparency International 2010) ou há registro que a organização estava envolvida em casos relacionados com a corrupção, nos últimos três anos.
<i>Categoria: Atores da cadeia de valor *não incluindo os consumidores</i>			
Concorrência leal	Há evidências de que a organização concorre de forma justa e em conformidade com a legislação de concorrência leal, ou práticas de monopólio (UNEP e SETAC 2010).	Não há registro de casos comprovados de que a organização tenha se envolvido em comportamento anti-competitivo, ou não tenha respeitado a regulamentação anti-trust, ou práticas de monopólio nos últimos três anos.	Há registro de casos comprovados de que a organização tenha se envolvido em comportamento anti-competitivo, ou não tenha respeitado a regulamentação anti-trust, ou práticas de monopólio nos últimos três anos.
Promover a responsabilidade social			
Relações com fornecedores	A organização possui um código de conduta com padrões definidos de comportamento ético esperado de seus fornecedores e comunica-lhes (UNEP e SETAC 2010).	A organização tem uma pontuação na pesquisa de satisfação entre fornecedores de 3,1 e 5 (Correa, 2009).	A organização tem uma pontuação na pesquisa de satisfação entre fornecedores de 1 e 3 (Correa, 2009).
O respeito dos direitos de propriedade intelectual	A organização possui evidência de respeito pela propriedade intelectual (UNEP e SETAC 2010)	Não há registro de casos comprovados de que a organização violou os direitos de propriedade intelectual nos últimos três anos.	Há registro de casos comprovados de que a organização violou os direitos de propriedade intelectual nos últimos três anos.

FONTE: ADAPTADO DE RAMIREZ et al.(2014).

ANEXO 2 – IMPACTO AMBIENTAL: MATRIZ PEDIGREE PARA ANÁLISE DE INCERTEZA

<i>Indicador (Pontuação)</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Indicadores (independentes do estudo em que os dados são aplicados)					
Confiabilidade da fonte	Dados verificados estão embasados em medições	Dados verificados estão embasados parcialmente ou em medidas não verificadas	Dados não verificados parcialmente embasados em hipóteses	Estimativa qualificada (por exemplo: técnico de indústria)	Estimativa não qualificada ou origem desconhecida
Completeza	Dados representam uma amostragem suficiente de locais num período adequado até mesmo fora das flutuações normais	Dados representam um número menor de locais mas para períodos adequados	Dados representam um número adequado de locais de por períodos menores	Dados representam um número menor de locais e por períodos menores ou dados incompletos de um adequado número de locais/períodos	Representatividade desconhecida ou dados incompletos de um pequeno número de locais e/ou de curtos períodos
Indicadores estão relacionados com a tecnologia e condições ambientais nas quais os dados são validados, sendo dependentes das metas de qualidade dos dados para o estudo em que estes são aplicados					
Correlação Temporal	Menos de 3 anos de diferença para o ano do estudo	Menos de 6 anos de diferença	Menos de 10 anos de diferença	Menos de 15 anos de diferença	Data do dado desconhecida ou mais de 15 anos de diferença
Correlação Geográfica	Dado dentro da área do estudo	Média dos dados mais ampla do que a área onde o estudo está incluído	Dados de uma área com condições de produção similares	Dados de uma área com condições de produção com alguma similaridade	Dados de uma área desconhecida ou com condições de produção muito diferentes
Correlação Tecnológica	Dados de empresa, processos e materiais contidos no estudo	Dados de processos e materiais contidos no estudo, mas de diferentes empresas	Dados de processos e materiais contidos no estudo, mas de diferentes tecnologias	Dados de processos ou materiais relacionados mas de mesma tecnologia	Tecnologias desconhecidas ou dados de processos ou materiais relacionados, mas de diferentes tecnologias

FONTE: WEIDEMA; WESNAES (1996)